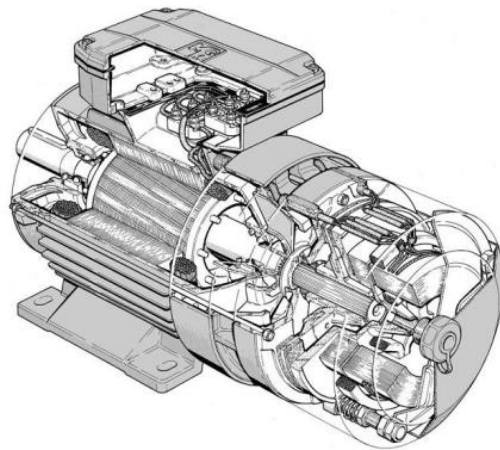


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА



ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІН
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА» та
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА В БУДІВНИЦТВІ»

*(для студентів усіх форм навчання за напрямками підготовки
6.060101 – «Будівництво», 6.060103 – «Гідротехніка (Водні ресурси)»)*



Харків
ХНУМГ
2013

Дорохов О. В. Текст лекцій з дисциплін «Електротехніка» та «Електротехніка в будівництві» (для студентів усіх форм навчання за напрямками підготовки 6.060101 – «Будівництво», 6.060103 – «Гідротехніка (Водні ресурси)») / О. В. Дорохов, Д. В. Тугай, Ю. П. Колонтаєвський; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х.: ХНУМГ, 2013. – 106 с.

Автори: доц., к.т.н. О. В. Дорохов
 доц., к.т.н. Д. В. Тугай
 доц., к.т.н. Ю. П. Колонтаєвський

Рецензент: доц., к.т.н. О. Ф. Білоусов

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,
протокол № 1 від 30.08.2011

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1. Постійний струм.....	7
1.1. Електричне коло, електрична схема та їхні елементи.....	7
1.2. Джерела напруги і струму. Перетворення джерела напруги у джерело струму і навпаки.....	7
1.3. Основні поняття, що характеризують електричні схеми. Лінійні та нелінійні електричні кола, розгалужені та нерозгалужені.....	9
1.4. Напруга на ділянці кола. Закон Ома для ділянки кола.....	9
1.5. Закони Кірхгофа.....	10
1.6. Енергетичний баланс у електричних колах постійного струму.....	11
1.7. Перетворення зірки опорів у еквівалентний трикутник.....	11
1.8. Передача енергії по лініям передачі.....	12
Розділ 2. Синусоїдний струм.....	14
2.1. Основні величини, що характеризують синусоїдний струм.....	14
2.2. Синусоїдний струм активного опору.....	15
2.3. Синусоїдний струм індуктивності.....	15
2.4. Синусоїдний струм ємності.....	16
2.5. Тригонометричний метод розрахунку кіл синусоїдного струму.....	17
2.6. Потужність в колах синусоїдного струму (активна, реактивна, повна).....	19
Розділ 3. Трифазні кола.....	20
3.1. Основні поняття і визначення.....	20
3.2. Основні схеми з'єднання трифазних кіл, визначення лінійних і фазних величин.....	21
3.3. Розрахунок трифазних кіл.....	24
3.4. Аварійні режими в трифазних колах.....	29
Розділ 4. Трансформатори.....	31
4.1 Принцип дії та конструкція трансформатора.....	31
4.2. Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів, паралельна робота трансформаторів.....	33
4.3. Особливі види трансформаторів.....	39
Розділ 5. Асинхронні машини.....	41
5.1. Принцип дії та конструкція асинхронних машин.....	41
5.2. Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів з фазними та короткозамкненими роторами.....	45
Розділ 6. Синхронні машини.....	47
6.1 Принцип дії та конструкція синхронних машин.....	47
Розділ 7. Машини постійного струму.....	52
7.1. Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	52
7.2. Будова та принцип дії генератора і двигуна постійного струму.....	54
7.3. Характеристики генераторів постійного струму незалежного, паралельного, послідовного та змішаного збудження.....	58
7.4. Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.....	62
7.5. Характеристики і застосування машин постійного струму.....	62

Розділ 8. Основи електропривода.....	64
8.1. Класифікація електроприводів.....	64
8.2. Поняття про динаміку електропривода.....	66
8.3. Вибір двигуна.....	66
8.4. Поняття про автоматичне керування електродвигуном.....	67
Розділ 9. Перетворювальні пристрої. Випрямлячі.....	69
9.1. Загальні відомості та класифікація.....	69
9.2. Експлуатаційні характеристики випрямлячів.....	70
9.3. Робота однофазного двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом на активне навантаження.....	72
9.4. Трифазні випрямлячі.....	75
9.5. Згладжуючі фільтри.....	80
Розділ 10. Електричні вимірювання.....	82
10.1. Похибки електровимірювальних приладів.....	82
10.2. Аналогові вимірювальні прилади.....	82
10.3. Електронні аналогові вимірювальні прилади.....	89
10.4. Цифрові вимірювальні прилади.....	91
Розділ 11. Електропостачання в будівництві.....	94
11.1. Поняття системи електропостачання, категорії споживачів електроенергії.....	94
11.2. Система електропостачання об'єктів будівництва.....	96
11.3. Електричні мережі будівельних майданчиків.....	98
Список джерел.....	105

ВСТУП

Електротехнікою називається широка область практичного застосування електромагнітних явищ. Електротехніка – дисципліна, що займається питаннями розрахунку та вивчення явищ, які характеризуються поняттями електричних струмів, напруг, потужностей, магнітних потоків, а також поняттями напруженості електричного та індукції магнітного полів.

Розвиток електротехніки показово відображає характерні суперечності науково-технічного прогресу, тісний взаємозв'язок науково-технічних проблем з соціальними, економічними і екологічними проблемами. Тому вивчення електротехніки грає важливу роль у формуванні майбутніх висококваліфікованих інженерів технічних спеціальностей.

Успіхи сучасної електротехніки є результатом значних творчих зусиль вчених і інженерів різних країн у дослідженні електричних і магнітних явищ з метою їх практичного застосування. Історія електротехніки визначається двома століттями свого розвитку. Після винаходу першого електрохімічного джерела електричної енергії (1799 рік) почалось дослідження властивостей електричного струму, було встановлено основні закони електричних кіл, створено різні конструкції електричних машин і приладів. Однак до 70-х років XIX століття широке застосування електричної енергії було неможливим внаслідок відсутності надійних і економічних генераторів. Розвиток промислового виробництва, розростання міст і торгівлі викликали створення більш досконалих джерел світла. Електричне освітлення стало першим масовим застосуванням електричної енергії, воно сприяло інтенсифікації розвитку електротехнічної промисловості. В 70–80 роках XIX століття електротехніка перетворюється у самостійну галузь науки і техніки, починається становлення електроенергетики. Але подальший розвиток практичних застосувань електричної енергії потребувало більш економічних і ефективних засобів її виробництва і розподілу, а також створення більш простих і надійних електродвигунів, що задовольняють потребам промислових електроприводів.

Комплексне вирішення вказаних науково-технічних проблем виявилось можливим лише на базі багатofазних систем, що були розроблені у самому початку 90-х років XIX століття і поклали початок електрифікації. Після цього історичного етапу електрична енергія починає все ширше використовуватись в промисловості, сільському господарстві, на транспорті і у побуті.

Сучасний об'єкт будівництва неможливо уявити без різноманітних електротехнічних пристроїв. Будівельні майданчики і, взагалі, самі будівельні споруди щільно насичені електротехнічним обладнанням, що застосовується як

у процесі будівництва, так і залишається для подальшого використання після його закінчення. Тому сучасний інженер-будівельник повинен не тільки мати чітку уяву про електромагнітні явища, що покладені в основу роботи того або іншого обладнання, але і приймати практично грамотні рішення у співпраці з інженером-електриком при проектуванні і подальшому зведені об'єкта будівництва.

Вивчення курсів "Електротехніка" і "Електротехніка в будівництві" потребує знання курсів фізики, а саме розділу "Електрика та магнетизм", і особливо математики, передусім розділів: системи лінійних алгебраїчних рівнянь, теорія матриць, похідна і інтеграл, диференційні рівняння, функціональні ряди, інтегральні перетворення Лапласа, векторна алгебра. Теоретичні положення курсу засвоюються ґрунтовно тільки тоді, коли вони використані для вирішення конкретних задач. У зв'язку із відносно невеликим часом, відведеним на вивчення курсу "Електротехніка" студентам спеціальності "Водопостачання та водовідведення", "Теплогазопостачання і вентиляція" (інженерна екологія), "Міське будівництво та господарство", "Охорона праці у будівництві", "Промислове та цивільне будівництво", "Технічне обслуговування та ремонт будівель", "Реконструкція будівель", скороченням кількості лекційних занять та збільшенням об'єму самостійної роботи виникла необхідність у виданні тексту лекцій, призначеного допомогти студентам вивчати теоретичний матеріал.

РОЗДІЛ 1. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

1.1. Електричне коло, електрична схема та їхні елементи

Електричне коло – це сукупність пристроїв, призначених для передачі, розподілу і взаємного перетворення електромагнітної та інших видів енергії та інформації, якщо процеси, що відбуваються в пристроях, можуть бути описані за допомогою понять про електрорушійну силу (ЕРС), струм та напругу.

Основні елементи електричного кола:

- джерела електричної енергії – пристрої, що перетворюють механічну, теплову, хімічну та інші види енергії в електромагнітну (генератор, акумуляторна батарея та ін.);
- перетворювачі електромагнітної енергії (трансформатори, перетворювачі частоти та ін.);
- пристрої передачі електромагнітної енергії (лінії передачі);
- споживачі електромагнітної енергії, що перетворюють електромагнітну енергію в механічну, теплову, хімічну та інші види (двигуни, лампи розжарювання, резистори та ін.).

Кожна група - це безліч різних приладів, які відрізняються за принципом дії, конструкцією тощо.

Іншими словами, *електричне коло* – це сукупність джерел та споживачів електромагнітної енергії, з'єднаних проводами, по яких може протікати електричний струм.

Кола, у яких процеси отримання електричної енергії в джерелах, передача та перетворення в споживачах відбувається при незмінних у часі струмах та напрузі, називаються *колами постійного струму*.

В курсі електротехніки електричне коло замінюють моделлю, графічним зображенням, що називається *електричною схемою*. Якщо говорити про електричну схему, то до споживачів електромагнітної енергії відносять (рис. 1.1):

- опір, [Ом] – ідеалізований елемент, що приблизно замінює резистор, у якому відбувається перетворення електричної енергії у теплову;
- ємність, [Ф] – ідеалізований елемент, що приблизно замінює конденсатор, у якому накопичується енергія електричного поля;
- індуктивність, [Гн] – ідеалізований елемент, що приблизно замінює котушку індуктивності, у якій може накопичуватися енергія магнітного поля.

До джерел електромагнітної енергії відносять джерела напруги і джерела струму.

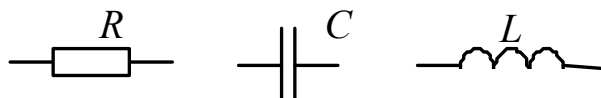


Рис.1.1 – Умовні позначення резистора, конденсатора та котушки індуктивності

1.2. Джерела напруги і струму. Перетворення джерела напруги у джерело струму і навпаки

Джерела є причиною виникнення струмів і напруг в електричних колах.

Для аналізу кіл використовують поняття ідеалізованих джерел напруги та струму. Під ідеалізованим *джерелом напруги* розуміють таке джерело, напруга U на затискачах якого не залежить від струму, що протікає через нього і яке характеризують тільки електрорушійною силою (рис. 1.2,а). Якщо джерело напруги не ідеалізоване, то воно має внутрішній опір, і тому напруга на затискачах залежить від значення струму, що протікає через нього (рис. 1.2,б).

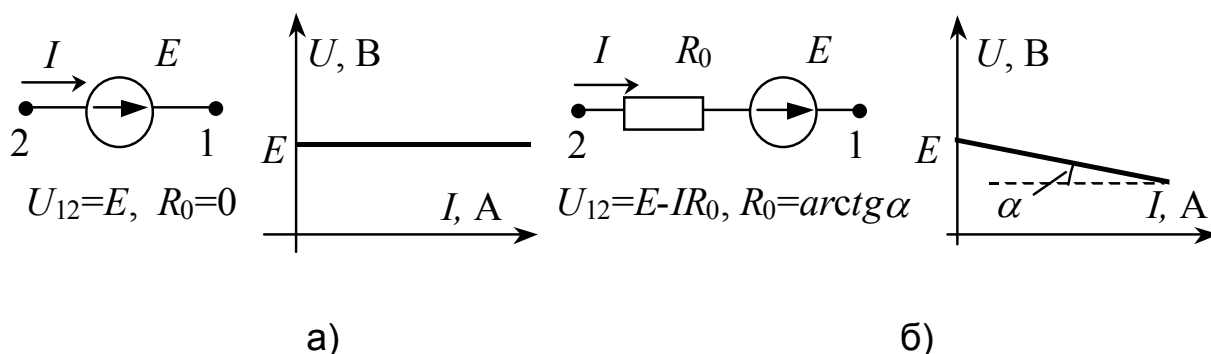


Рис. 1.2 – Ідеалізоване (а) і неідеалізоване (б) джерела напруги і їхні ВАХ

Під ідеалізованим *джерелом струму* розуміють таке джерело енергії, сила струму якого j не залежить від навантаження, до якого це джерело підімкнене (внутрішній опір такого джерела $R_0 \rightarrow \infty$). Умовне позначення ідеалізованого джерела струму та його ВАХ представлені на рис.1.3.

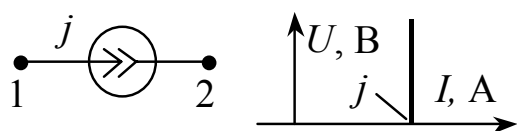


Рис. 1.3 – Ідеалізоване джерело струму

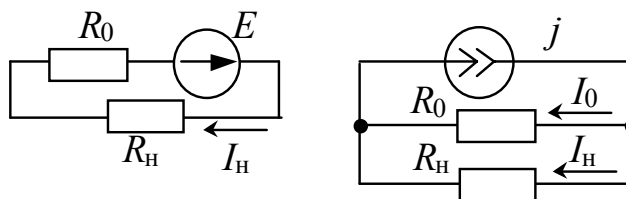


Рис.1.4 – Перетворення джерела напруги у джерело струму

Фізично виконати ідеалізовані джерела струму та напруги неможливо.

При розрахунку електричних кіл реальне джерело напруги з ЕРС E_0 та внутрішнім опором R_0 , що з'єднане з навантаженням, може бути представлено двома способами (рис. 1.4,а і рис. 1.4,б). Ці схеми еквівалентні у відношенні потужності, що споживається навантаженням, та нееквівалентні у відношенні потужності, що споживається внутрішнім опором R_0 . Для схеми рис.1.4, а:

$$E = U_n + I_n \cdot R_0, \quad (1.1)$$

$$\frac{E}{R_0} = \frac{U_n}{R_0} + I_n. \quad (1.2)$$

Позначимо $\frac{E}{R_0} = j$ та $\frac{U_n}{R_0} = I_0$. Тоді $j = I_0 + I_n$, і цьому рівнянню

відповідає схема рис.1.4, б.

Формула $\frac{E}{R_0} = j$ застосовується для переходу від реального джерела

напруги до реального джерела струму і навпаки. У відношенні енергії, що споживається внутрішнім опором R_0 , ці схеми нееквівалентні, тобто для рис.1.4,а - $P_0 = I_H^2 \cdot R_0$, а для рис.1.4,б - $P_0 = I_0^2 \cdot R_0$.

Потужність, що споживається опором навантаження R_H , для обох схем однакова

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H. \quad (1.3)$$

1.3. Основні поняття, що характеризують електричні схеми. Лінійні та нелінійні електричні кола, розгалужені та нерозгалужені

Основними поняттями, що характеризують електричні схеми є *вітка*, *вузол*, *контур*.

Вітка – ділянка кола, вздовж якої протікає один і той же струм; утворюється вітка кількома послідовно з'єднаними елементами

Вузол – точка на схемі, де з'єднуються три і більше вітки. *Вітки*, приєднані до одних і тих самих вузлів, звуться паралельними.

Контур – будь-який замкнутий шлях, що проходить по декількох вітках.

Лінійні електричні кола – кола, усі елементи котрих лінійні (резистор, ємність, індуктивність), тобто мають лінійні вольт-амперні характеристики. Якщо коло має хоча б один нелінійний елемент (діод, стабілітрон, лампа розжарювання та ін.), то воно *нелінійне*.

Розгалуженим колом називається коло, що має три і більше вітки, два і більше незалежних контурів.

Нерозгалуженим колом називається коло, що має тільки один контур.

1.4. Напруга на ділянці кола. Закон Ома для ділянки кола

Напруга на ділянці кола – це різниця потенціалів між крайніми точками цієї ділянки. За визначенням: $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$. При протіканні через опір R струму I : $\varphi_a > \varphi_b$ на значення падіння напруги на опорі R , тобто $\varphi_a = \varphi_b + I \cdot R$, або $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = I \cdot R$.

Таким чином: $I = \frac{U_{ab}}{R}$ – закон Ома для ділянки кола, що не має у своєму складі ЕРС (рис. 1.5,а).

Розглянемо ділянку кола, що має у своєму складі ЕРС (рис. 1.5,б). Для цього кола справедливими будуть вирази:

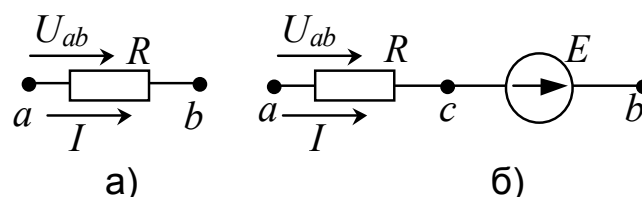


Рис. 1.5 – Ділянки кола без ЕДС (а)
та з ЕДС (б)

$$\left. \begin{aligned} U_{ab} &= \varphi_a - \varphi_b \\ \varphi_a &= \varphi_c + I \cdot R \\ \varphi_c &= \varphi_b - E \end{aligned} \right\} \Rightarrow \varphi_a - \varphi_b = \varphi_c + I \cdot R - \varphi_c - E; \quad (1.4)$$

З попереднього виразу маємо $U_{ab} = I \cdot R - E$, або $I = \frac{U_{ab} + E}{R}$ – закон

Ома для ділянки кола, що має у своєму складі ЕРС (рис.1.5,б).

Якщо ділянка кола має у своєму складі кілька ЕРС, спрямованих у різні сторони, а також кілька опорів, то закон Ома матиме вигляд:

$$I = \frac{U_{ab} \pm E_i}{\sum R_i}. \quad (1.5)$$

Примітка: коли напрями ЕРС E_i та напруги U_{ab} співпадають з напрямом струму I на ділянці ab , то у чисельнику беремо E_i та напругу U_{ab} зі знаками "+", та навпаки.

1.5. Закони Кірхгофа

Перший закон Кірхгофа виражає закон збереження заряду: алгебраїчна сума струмів віток, які сходяться у вузлі, в будь який момент часу дорівнює

нулю – $\sum_{k=1}^n I_k = 0$, де k – номери віток, зв'язані з даним вузлом. Якщо струм

спрямований до вузла, то він входить у рівняння зі знаком "+", якщо від вузла – зі знаком "-".

Другий закон Кірхгофа виражає закон збереження енергії: алгебраїчна сума напруг віток замкнутого контуру дорівнює нулю в будь-який момент часу

– $\sum_{i=1}^m U_i = 0$, де i – номер вітки, що входить у контур. Частіше використовують

інше формулювання другого закону: сума падінь напруги вздовж контуру дорівнює сумі ЕРС вздовж цього контуру (знаки ЕРС або падінь напруги залежать від їх напрямів і обраних напрямів обходу контурів).

За першим законом Кірхгофа треба скласти $n-1$ рівнянь, де n – кількість вузлів у схемі. За другим законом Кірхгофа треба скласти $(m-n+1)$ рівнянь, де m – кількість віток у схемі з невідомими струмами (якщо у вітці міститься джерело струму, то струм цієї вітки відомий). Отже, система рівнянь за законами Кірхгофа повинна мати стільки рівнянь, скільки є невідомих струмів (віток).

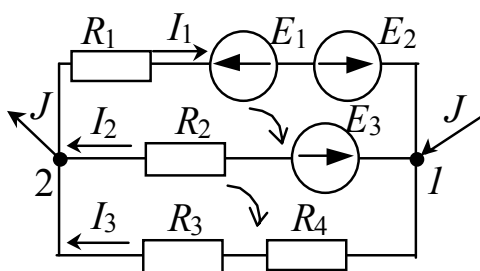


Рис. 1.6 – Приклад розгалуженого кола

Розглянемо приклад складання системи рівнянь за законами Кірхгофа для схеми (рис.1.6):

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 + j = 0 \\ I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = E_2 - E_1 - E_3 \\ -I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot (R_3 + R_4) = E_3 \end{cases} \quad (1.6)$$

Порядок розрахунку за законами Кірхгофа:

1. Довільно вибираємо напрями струмів у вітках і напрями обходу контурів.
2. Визначаємо кількість вузлів і віток у схемі, а отже і кількість рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа.
3. Складаємо і розв'язуємо систему рівнянь.

1.6. Енергетичний баланс у електричних колах постійного струму

На підставі закону збереження енергії: кількість тепла, що виділяється в опорах схеми повинна дорівнювати енергії, що доставляється за той же самий час джерелами енергії, тобто потужність джерел енергії (напруги і струму) рівняється потужності, що споживається опорами схеми:

$$\sum_{i=1}^n (\pm E_i \cdot I_i) + \sum_{i=1}^m J_i \cdot U_{ab} = \sum_{i=1}^l I_i^2 \cdot R_i, \quad (1.7)$$

де n – кількість ЕРС у схемі;

m – кількість джерел струму у схемі;

l – кількість опорів у схемі;

U_{ab} – напруга між точкою a , куди втікає струм джерела струму, та точкою b , звідки струм джерела струму витікає.

Правило складання балансу: якщо напрям джерела ЕРС E_i і напрям струму I_i , що протікає через нього, співпадають, то доданок $E_i \cdot I_i$ беремо зі знаком "+", навпаки - зі знаком "-".

Приклад складання балансу для схеми рис. 1.6:

$$-E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_1 - E_3 \cdot I_2 + J \cdot U_{12} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot (R_3 + R_4). \quad (1.8)$$

1.7. Перетворення зірки опорів у еквівалентний трикутник

Зіркою опорів зветься таке з'єднання трьох опорів, при якому усі початки опорів, поєднані в одну точку (рис.1.7,а), трикутником опорів зветься таке з'єднання трьох опорів, при якому початок одного опору з'єднується з кінцем іншого (рис. 1.7,б).

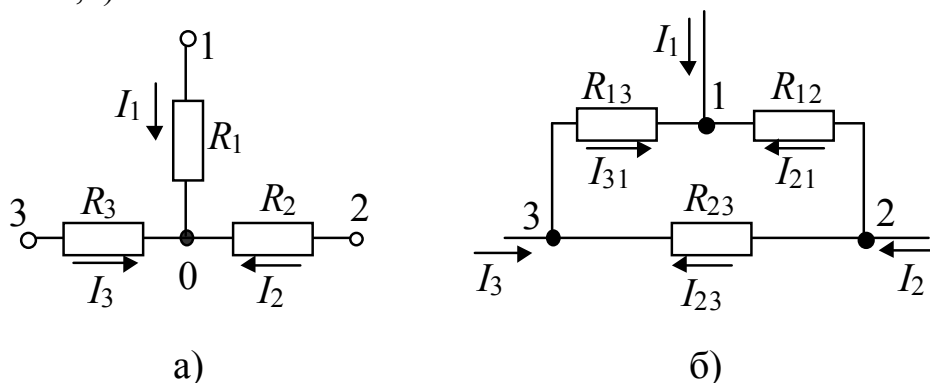


Рис. 1.7 – З'єднання опорів у зірку (а) та трикутник

Схеми рис. 1.7,а та рис. 1.7,б еквівалентні у відношенні струмів I_1 , I_2 , I_3 та потенціалів вузлів 1, 2 і 3, якщо виконуються наступні співвідношення:

$$R_{12} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{G_1 \cdot G_2} = \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2}} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} ; \quad (1.9)$$

$$R_{13} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{G_1 \cdot G_3} = \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_3}} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} ; \quad (1.10)$$

$$R_{23} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{G_2 \cdot G_3} = \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_2} \cdot \frac{1}{R_3}} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (1.11)$$

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \quad (1.12)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \quad (1.13)$$

$$R_3 = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}. \quad (1.14)$$

Формули (1.21) ÷ (1.23) застосовуються для переходу від зірки опорів до трикутника, а (1.24) ÷ (1.26) – для переходу від трикутника опорів до зірки.

1.8. Передача енергії по лініям передачі

Спрощена схема передачі електричної енергії зображена на рис.1.8

На схемі позначено:

U_1 – напруга генератора в на початку лінії;

U_2 – напруга на навантаженні (на кінці лінії);

R_n – опір навантаження на кінці лінії;

R_0 – опір проводів.

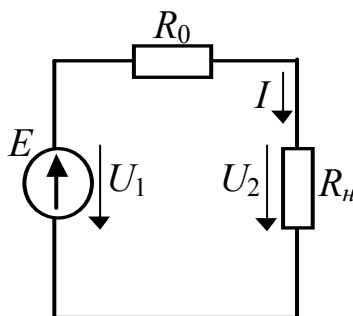


Рис. 1.8 – Спрощена схема передачі електричної енергії

В реальних лініях передач $\eta = 0,94 \div 0,97$, тому U_2 усього на кілька процентів відрізняється від U_1 .

Побудуємо криві (рис. 1.9), що повністю характеризують режим роботи лінії, при $U_1 = \text{const}$:

1. $P_1 = U_1 \cdot I$ – потужність генератора;

2. $U_2 = U_1 - I \cdot R_1$ – напруга на навантаженні;

3. $P_2 = P_1 - I^2 \cdot R_1 = U_1 \cdot I - I^2 \cdot R_1 = I \cdot (U_1 - I \cdot R_1)$ – потужність в навантаженні;

$$4. \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_1 \cdot I - I^2 \cdot R_1}{U_1 \cdot I} = 1 - \frac{I \cdot R_1}{U_1} = \frac{I^2 \cdot R_2}{(R_1 + R_2) \cdot I^2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ – к.к.д.}$$

При $P_2 = const$ з підвищенням U_2 можна зменшити значення струму I і тому втрати у проводах P_{np} знижуються, що дозволяє зменшити перетин проводів:

$$P_{np} = R_{np} \cdot I^2 = \rho \cdot \frac{2 \cdot l_{np}}{S_{np}} \cdot \left(\frac{P_2}{U_2} \right)^2. \quad (1.15)$$

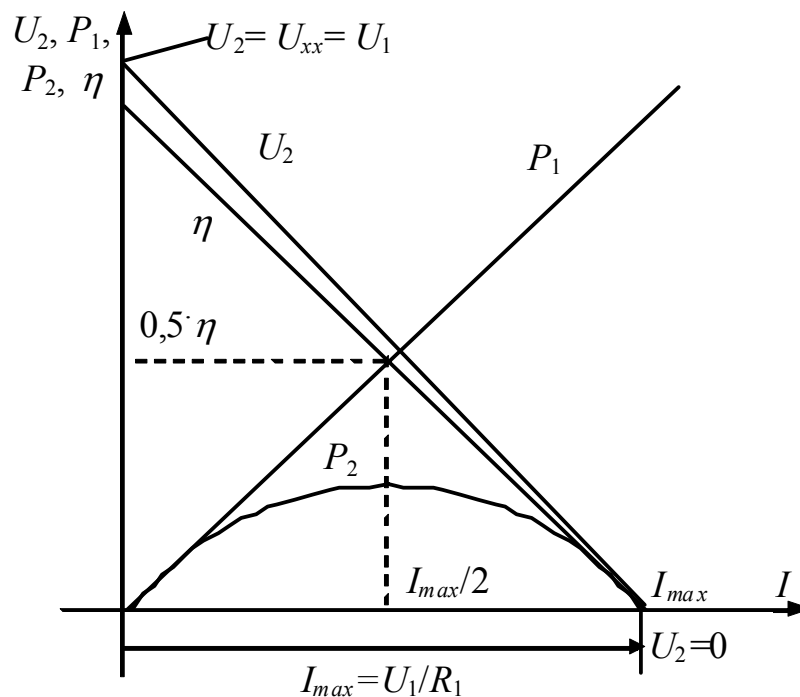


Рис. 1.9 – Характеристики режимів роботи лінії

РОЗДІЛ 2. СИНУСОЇДНИЙ СТРУМ

2.1. Основні величини, що характеризують синусоїдний струм

Струм, що змінюється по закону синуса зветься *синусоїдним* (рис.2.1). Миттєве значення такого струму:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) = I_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t + \varphi\right), \quad (2.1)$$

де I_m – амплітудне, тобто максимальне значення струму, А;

φ – початкова фаза, визначає значення зміщення синусоїди відносно нуля (якщо $\varphi > 0$ синусоїда зсунута вліво, а якщо $\varphi < 0$ синусоїда зсунута вправо), градуси;

T – період, тобто час, за який відбувається одне повне коливання, с;

f – частота коливань, тобто кількість коливань в секунду, 1/с=Гц;

ω – кутова частота, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, рад/с;

$(\omega \cdot t + \varphi)$ – фаза, аргумент синуса, характеризує стан коливання.

Якщо у синусоїдних величин однієї частоти однакові початкові фази, то говорять, що такі синусоїдні величини співпадають за фазою; якщо різниця фаз між синусоїдними величинами становить $\pm \pi$, то говорять, що ці величини знаходяться у протифазі, а якщо різниця фаз між синусоїдними функціями становить $\pm \pi/2$, то говорять, що ці функції знаходяться у квадратурі.

Синусоїдні струми відносно низьких частот отримують за допомогою синхронних генераторів, а синусоїдні струми високої частоти (більше десятків кілогерц) – за допомогою напівпровідникових генераторів.

На рис. 2.1 показана крива миттєвого значення струму (так звана хвильова діаграма), коли $\varphi > 0$.

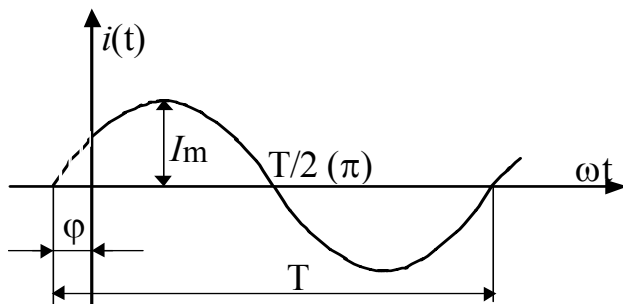


Рис. 2.1 – Крива миттєвого значення струму

Синусоїдна величина характеризується значеннями:

- миттєвим,
- амплітудним,
- середнім,
- діючим.

Середнє значення синусоїдної величини – це її середнє значення за половину періоду:

$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \cdot \sin \omega t \, dt = \frac{2}{\pi} \cdot I_m, \quad I_{cp} = 0,638 \cdot I_m. \quad (2.2)$$

Діюче значення синусоїдного струму чисельно дорівнює значенню постійного струму, який за час, що дорівнює періоду T , викликає виділення такої кількості тепла в провіднику з опором R , що і синусоїдний струм за той же час T . Діючий струм називають ще *ефективним* або *середньоквадратичним*.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot \sin \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \, dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m. \quad (2.3)$$

Коефіцієнти, що характеризують синусоїдну функцію:

- коефіцієнт амплітуди $k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2}$;

- коефіцієнт форми $k_a = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{I_m / \sqrt{2}}{2 / \pi \cdot I_m} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}}$.

2.2. Синусоїдний струм активного опору

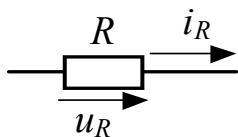


Рис. 2.2 – Схема заміння активного опору

Взагалі активний опір на змінному струмі R_{\sim} є більшим, ніж активний опір на постійному струмі $R_{\text{—}}$, внаслідок явищ концентрації струму в поверхневих шарах провідника (поверхневий ефект) і ефекту близькості. Але будемо вважати, що $R_{\sim} = R_{\text{—}}$.

Нехай через активний опір тече синусоїдний струм:

$i = I_m \cdot \sin \omega t$. За законом Ома:

$u_R = i \cdot R = I_m \cdot R \cdot \sin \omega t = U_m \cdot \sin \omega t$, де $U_m = I_m \cdot R$ – амплітудне значення напруги на активному опорі.

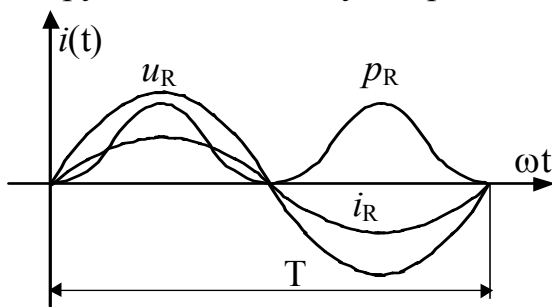


Рис. 2.3 – Криві миттєвих значень струму, напруги і потужності активного опору

З наведених співвідношень ми бачимо, що струм і напруга на активному опорі співпадають за фазою (різниця фаз між напругою і струмом дорівнює нулю: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0$ – рис. 2.3).

Миттєва потужність активного опору.

Швидкість надходження енергії від джерел характеризується потужністю.

Миттєва потужність – добуток миттєвої напруги на ділянці кола на миттєвий струм. Для активного опору:

$$p_R = u_R \cdot i_R = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega t)). \quad (2.4)$$

Таким чином ми бачимо, що миттєва потужність має постійну складову – $\frac{U_m \cdot I_m}{2}$, та змінну складову – $\frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega t)$. Миттєва потужність в активному опорі має тільки позитивне значення та частоту в 2 рази більшу, ніж частота синусоїдного струму.

Активна потужність – це середнє значення миттєвої потужності за період:

$$P_R = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p_R dt = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = U \cdot I = I^2 \cdot R. \quad (2.5)$$

2.3. Синусоїдний струм індуктивності

Будь-яка обмотка (катушка) має індуктивність і активний опір. Як відомо, *індуктивність* – це елемент схеми заміння, що дозволяє врахувати при розрахунках явища самоіндукції і накопичування енергії магнітного поля. Схема

заміщення індуктивності представлена на рис. 2.4. Нехай активним опором тече синусоїдний струм: $i = I_m \cdot \sin \omega t$. У котушці наводиться ЕРС:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega \cdot L \cdot I_m \cos(\omega t) = -\omega \cdot L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (2.6)$$

Позитивний напрямок ЕРС співпадає зі струмом, а напруга на індуктивності:

$$u_L = \varphi_a - \varphi_b = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{mL} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (2.7)$$

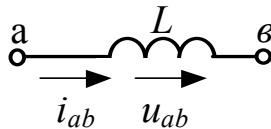


Рис. 2.4 – Схема заміння індуктивності

де $U_{mL} = I_m \cdot \omega \cdot L = I_m \cdot X_L$ – амплітудне значення напруги на активному опорі; $X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ – індуктивний опір, Ом.

З (2.7) бачимо, що напруга на індуктивності випереджає струм на 90° (різниця фаз між напругою і струмом дорівнює: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 90^\circ$) – рис. 2.4. Тобто, якщо

$u_L = 0$, то $i_L = \max$ – див. рис. 2.5.

Миттєва потужність індуктивності:

$$p_L = u_L \cdot i_L = U_{mL} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega t). \quad (2.8)$$

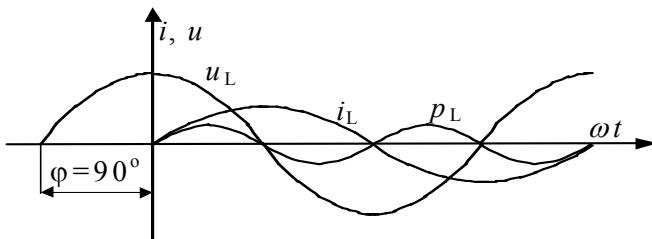


Рис. 2.5 – Криві миттєвих значень струму, напруги і потужності індуктивності

Миттєва потужність індуктивності може мати позитивний знак – тоді індуктивність накопичує енергію, що береться з джерела, або від'ємний знак – тоді індуктивність віддає енергію в джерело.

Активна потужність індуктивності:

$$P_L = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p_L dt = 0. \quad (2.9)$$

2.4. Синусоїдний струм ємності

Ємність (рис. 2.6) як елемент схеми заміння дозволяє врахувати явища заряду конденсатора і накопичування енергії електричного поля. Якщо

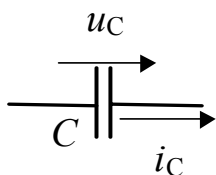


Рис. 2.6 – Схема заміння ємності

$u_C = \text{const}$, то $i_C = \frac{dq}{dt} = 0$. Якщо $u_C = U_m \cdot \sin(\omega t)$, то

$q = C \cdot u_C = C \cdot U_m \cdot \sin(\omega t)$ і конденсатор періодично

перезаряджається, що супроводжується протіканням через нього зарядного струму:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = \frac{d(C \cdot U_{mC} \cdot \sin(\omega \cdot t))}{dt} = \omega \cdot C \cdot U_{mC} \cdot \cos(\omega \cdot t) =$$

$$= \frac{1}{X_C} \cdot U_{mC} \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ) = U_{mC} \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ) \quad (2.10)$$

$$\text{де } U_{mC} = I_m \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} = I_m \cdot X_C - \quad (2.11)$$

амплітудне значення напруги на ємності;

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} - \text{ємнісний опір, Ом.} \quad (2.12)$$

З (2.10) ми бачимо, що струм ємності випереджає напругу на ній на 90° (різниця фаз між напругою і струмом дорівнює: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -90^\circ$) – рис. 2.8. Тобто, якщо $u_C = 0$, то $i_C = \max$ – див рис. 2.7.

Миттєва потужність ємності (може мати позитивний і від'ємний знаки):

$$p_C = u_C \cdot i_C = U_{mC} \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t). \quad (2.13)$$

Активна потужність ємності:

$$P_C = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p_C dt = 0. \quad (2.14)$$

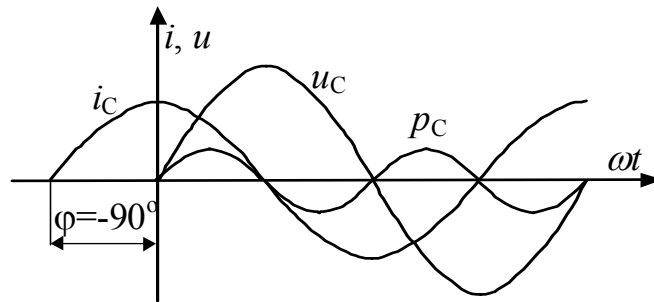


Рис. 2.7 – Криві миттєвих значень струму, напруги і потужності ємності

2.5. Тригонометричний метод розрахунку кіл синусоїдного струму

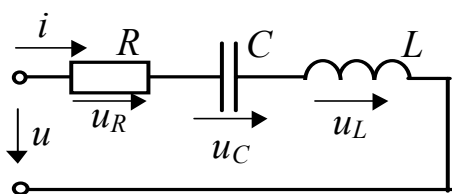


Рис. 2.8 – Послідовне з'єднання активного опору, ємності і індуктивності

Розглянемо послідовне з'єднання активного опору, ємності, індуктивності (рис. 2.8). Нехай до кола прикладено синусоїдну напругу $u_C = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$. В колі протікає синусоїдний струм $i = I_m \cdot \sin \omega t$.

За другим законом Кірхгофа для миттєвих значень:

$$u = u_R + u_C + u_L \quad (2.15)$$

З урахуванням раніш розглянутого:

$$u = I_m R \sin(\omega \cdot t) + I_m X_L \cos(\omega \cdot t) - I_m X_C \cos(\omega \cdot t) \quad (2.16)$$

або

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = I_m \cdot (R \cdot \sin(\omega \cdot t) + \cos(\omega \cdot t) \cdot (X_L - X_C)) \quad (2.17)$$

Позначимо $X = X_L - X_C$ – реактивний опір кола, тоді

$$R \cdot \sin(\omega \cdot t) + X \cdot \cos(\omega \cdot t) = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.18)$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{X}{R} \text{ – кут зсуву фаз між напругою } u \text{ і струмом } i; \quad (2.19)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ –} \quad (2.20)$$

– модуль повного опору кола.

Отже вираз (2.17) можна записати:

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = I_m \cdot Z \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2.21)$$

або

$$U_m = I_m \cdot Z. \quad (2.22)$$

Розглянемо схему рис. 2.9 – паралельне з'єднання трьох елементів – активного опору, ємності і індуктивності.

$u_C = U_m \cdot \sin(\omega t)$, $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ – напруга та струм на вході кола.

Перший закон Кірхгофа:

$$i = i_R + i_C + i_L. \quad (2.23)$$

З урахуванням раніш розглянутого:

$$i_R = U_m \cdot G \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.24)$$

$$\text{де } G = \frac{1}{R} \text{ – активна провідність;} \quad (2.25)$$

$$i_C = U_m \cdot B_C \cdot \cos(\omega \cdot t) = U_m \cdot \omega \cdot C \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (2.26)$$

$$B_C = \omega \cdot C \quad (2.27)$$

– реактивна ємнісна провідність;

$$i_L = -U_m \cdot B_L \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (2.28)$$

$$\text{де } B_L = \frac{1}{\omega \cdot L} \text{ –} \quad (2.29)$$

– реактивна індуктивна провідність.

Тоді вираз (2.30) набуває вигляду:

$$I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = U_m \cdot [G \cdot \sin(\omega \cdot t) - (B_L - B_C) \cdot \cos(\omega \cdot t)], \quad (2.30)$$

або

$$I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = U_m \cdot \sqrt{G^2 + B^2} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi), \quad (2.31)$$

де φ – кут зсуву фаз між напругою u і струмом i ,

$$\varphi = \arctg \frac{G}{B_L - B_C} = \arctg \frac{G}{B}; \quad (2.32)$$

$$B = B_L - B_C \text{ –} \quad (2.33)$$

– реактивна провідність.

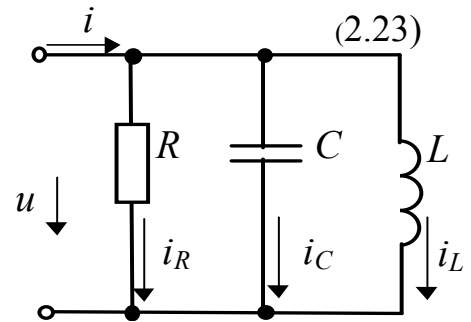


Рис. 2.9 – Паралельне з'єднання активного опору, ємності і індуктивності

Застосуємо позначення

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (2.34)$$

– повна провідність кола

Остаточно

$$I_m = U_m \cdot Y \quad (2.35)$$

Формули (2.24), (2.26), (2.27), (2.29), (2.32), (2.36), (2.39), (2.40), (2.41), (2.42) – основа для розрахунку найпростіших кіл синусоїдного струму тригонометричним методом.

2.6. Потужність в колах синусоїдного струму (активна, реактивна, повна)

Розрізняють повну, активну, реактивну потужності.

Припустимо, до якоїсь складного кола прикладена синусоїдна напруга $u = U_m \cdot \sin(\omega t)$, на вході кола тече синусоїдний струм $i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$.

Миттєва потужність:

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = U \cdot I \cdot (\cos \varphi - \cos(2\omega \cdot t - \varphi)) \quad (2.36)$$

Активна потужність – середнє значення p за період, тобто енергія, що виділяється в одиницю часу у вигляді теплоти на ділянці кола, що містить опір R :

$$P = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p \, dt = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos \varphi \cdot 2 \cdot \pi = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (2.37)$$

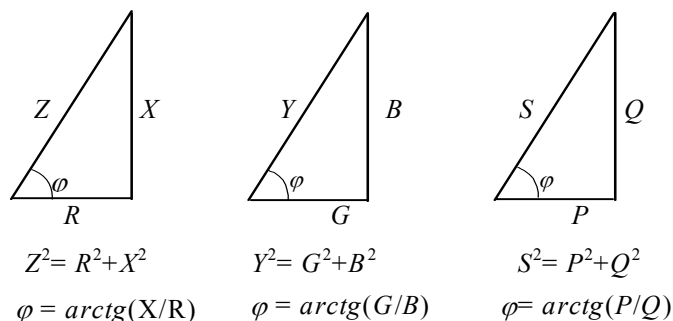
де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності

При розрахунках синусоїдних кіл застосовують поняття *реактивної потужності*: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$.

Реактивна потужність від'ємна при відстаючому струмі (R - L навантаження, $\varphi > 0$) і негативна при випереджаючому струмі (R - C навантаження, $\varphi < 0$). Тобто індуктивність можна розглядати як споживач реактивної енергії, а ємність – як її генератор.

Оскільки електричні машини і апарати конструюють для роботи на визначені значення струмів і напруг, то їх характеризують не активною, що залежить від $\cos \varphi$, а *повною потужністю*:

$$S = U \cdot I. \quad (2.38)$$



Повна потужність показує ту активну потужність, яку джерело живлення може віддати споживачу, якщо останній працює при $\cos \varphi = 1$.

Трикутники опорів, провідностей і потужностей (рис. 2.10):

Рис. 2.10 – Трикутники опорів, провідностей і потужностей

РОЗДІЛ 3. ТРИФАЗНІ КОЛА

3.1. Основні поняття і визначення

Сукупність електричних кіл, в яких діють створені спільним джерелом синусоїдні електрорушійні сили (ЕРС) однакової частоти та амплітуди, але які

відрізняються один від одного на кут $\frac{2 \cdot \pi}{m}$ (m – кількість

фаз) – це багатofазні симетричні системи. Багатofазні системи бувають дво-, три-, чотири-, шести-, дванадцятифазними.

Трифазна симетрична система ЕРС – сукупність трьох синусоїдних ЕРС одної частоти, що мають однакові амплітуди та зсунуті між собою на 120° . Принцип отримання трифазної системи ЕРС: у рівномірному магнітному полі з постійною кутовою швидкістю ω обертаються 3 однакові жорстко скріплені одна з іншою котушки. Площини котушок зміщені в просторі відносно одна одної на 120° . В кожній котушці наводяться ЕРС однакової частоти і амплітуди $e = E \cdot \sin \omega \cdot t$, зсунуті на 120° між собою (рис. 3.1).

Графік миттєвих значень ЕРС e_A , e_B , e_C зображено на рис. 3.2, а векторні діаграми – на рис. 3.3.

Чередування фаз – послідовність проходження ЕРС через однакові значення (наприклад, через нуль). Таке чередування фаз, коли початкова фаза ЕРС e_A дорівнює нулю, початкова фаза ЕРС e_B дорівнює мінус 120° , а початкова фаза ЕРС e_C дорівнює плюс 120° , називається *прямим*; миттєві значення фазних ЕРС при цьому:

$$\begin{aligned} e_A &= E \cdot \sin \omega \cdot t; \\ e_B &= E \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \\ e_C &= E \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3.1)$$

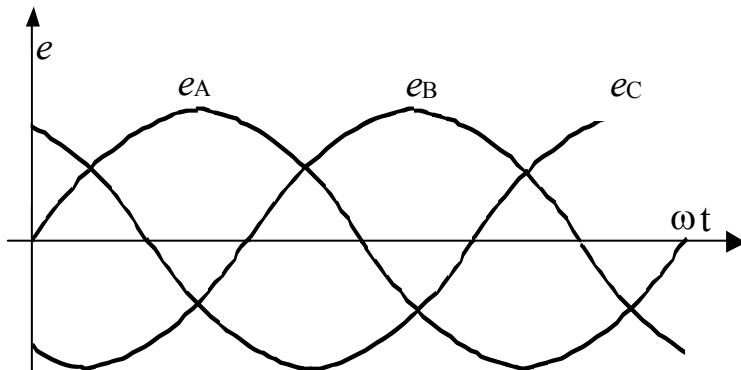


Рис. 3.2 – Криві миттєвих значень ЕРС трифазної системи

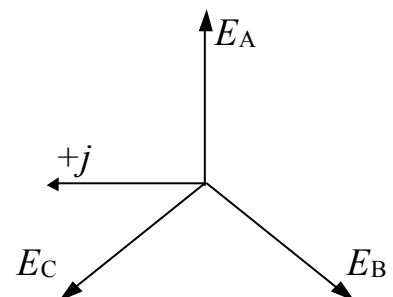


Рис.3.3 – Векторна діаграма ЕРС трифазної системи

Трифазне коло це сукупність трифазної система ЕРС, трифазного навантаження чи навантажень та з'єднуючих проводів.

Фаза – ділянка трифазного кола, якою тече один і той же струм.

Переваги трифазних систем у порівняння з іншими багатофазними системами:

1) передача енергії на великі відстані трифазним струмом більш економічна з точки зору економії металу;

2) елементи трифазної системи, такі як асинхронний двигун, трифазний генератор і трансформатор є простими у виробництві, економічні, надійні у роботі;

3) система має характеристики незмінності величини миттєвої потужності за період синусоїдного струму, якщо навантаження в усіх трьох фазах однакове.

Усі ланки трифазного кола було розроблено російським вченим М.О. Доливо-Добровольским. Виводам фазних обмоток генераторів надають найменування "початок" і "кінець". Початки позначають буквами А, В, С, а кінці – х, у, z.

3.2. Основні схеми з'єднання трифазних кіл, визначення лінійних і фазних величин

Основні схеми з'єднання в трифазних колах - це схеми з'єднання зіркою та трикутником.

3.2.1. З'єднання обмоток генератора зіркою

Якщо всі "початки", або всі "кінці" фазних обмоток з'єднані в один вузол (нейтральну точку чи, якщо вона заземлена, в нульову) – таке з'єднання називається *зіркою* (рис. 3.4).

Проводи, що з'єднують обмотки генератора або трансформатора з навантаженням, називаються *лінійними*, а провід, що з'єднує нейтральні або нульові точки генератора та навантаження, відповідно – *нейтральний* чи *нульовий*.

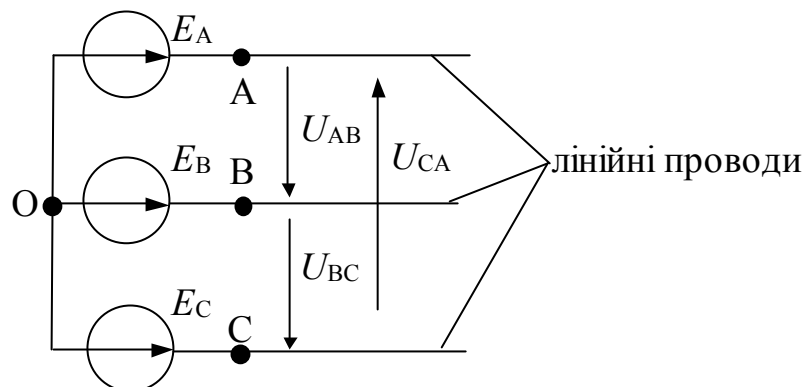


Рис. 3.4 – З'єднання обмоток трифазного генератора у зірку

Співвідношення між фазними та лінійними напругами

Напруги між початком та кінцем обмотки генератора ($\dot{U}_{AO} = \dot{E}_A$, $\dot{U}_{BO} = \dot{E}_B$, $\dot{U}_{CO} = \dot{E}_C$) або на фазних навантаженнях (\dot{U}_{AO_1} , \dot{U}_{BO_1} , \dot{U}_{CO_1}) – це фазні напруги.

Лінійні напруги дорівнюють різниці потенціалів між точками А, В, С або різниці фазних напруг.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{BO}; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{CO}; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{AO}. \quad (3.2)$$

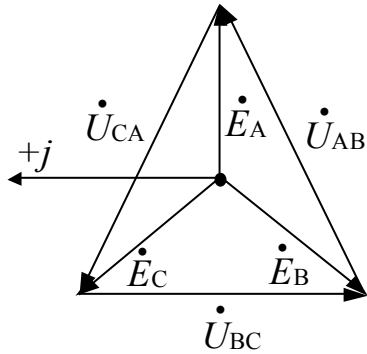


Рис.3.5 – Векторна діаграма фазних і лінійних напруг

У відповідності до виразів (3.2) побудуємо векторну діаграму лінійних та фазних напруг (рис. 3.5), з якої видно, що при прямому чередуванні фаз лінійні напруги в $\sqrt{3}$ більші, ніж фазні та випереджають їх на 30° , тобто співвідношення між комплексами лінійних та фазних напруг мають

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{AO} \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} &= \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{BO} \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} &= \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{CO} \cdot e^{j30^\circ}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

вигляд (3.3).

3.2.1. З'єднання обмоток генератора трикутником

При з'єднанні в трикутник фазні обмотки генератора, трансформатора або навантаження з'єднані одна з одною послідовно таким чином, що "початок" однієї фази генератора (або навантаження) з'єднується з "кінцем" іншої фази (рис. 3.6), а кожна фаза навантаження вмикається між лінійними проводами, внаслідок чого вона знаходиться під лінійною напругою. Лінійна напруга одночасно є і фазною напругою, тобто: $\dot{U}_o = \dot{U}_\phi$.

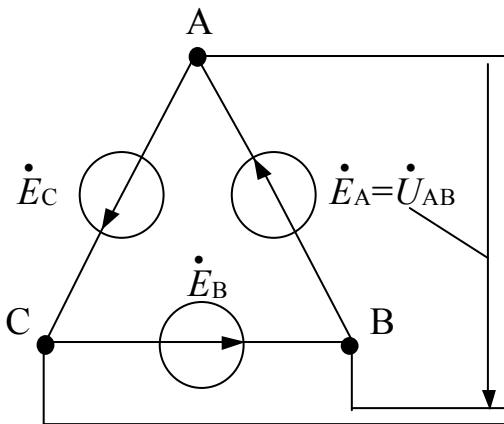


Рис. 3.6 – З'єднання обмоток трифазного генератора трикутником

Якщо до затисків генератора не підключене навантаження, то по обмоткам не буде протікати струм, тому що:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = E \cdot \left(1 + 1 \cdot e^{j120^\circ} + 1 \cdot e^{j120^\circ} \right) = 0$$

3.2.2. З'єднання обмоток генератора та трифазного навантаження за типом "зірка-зірка"

При з'єднанні "зірка-зірка" обмотки генератора та фазні навантаження поєднуються зіркою. Таке трифазне коло може бути без нейтрального проводу (трипровідна система, рис. 3.7) або з нейтральним проводом (чотирипровідна система, рис. 3.8).

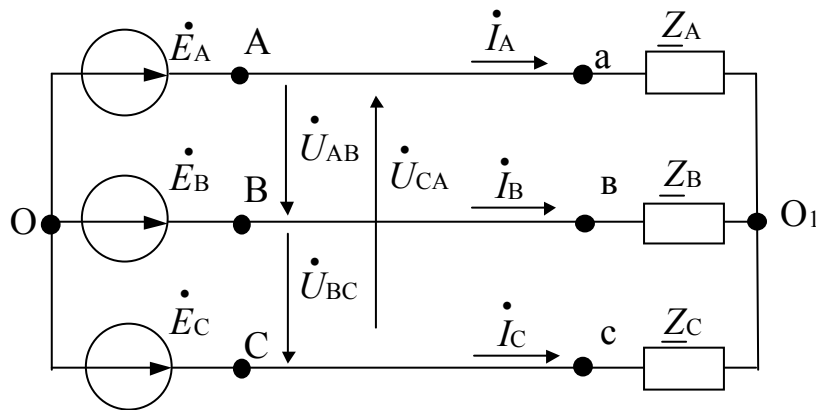


Рис. 3.7 – З'єднання за типом "зірка-зірка" без нейтрального проводу

Проводи, що з'єднують генератор та навантаження, називаються лінійними, струми, що течуть ними – лінійними струмами ($\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$), а напруга між лінійними проводами – лінійною напругою ($\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$). Для схем рис. 3.7 та рис. 3.8 фазні струми, що течуть по променях зірки, дорівнюють лінійним. Струм, що тече по нейтральному проводу (рис. 3.8) – це струм нейтрального або нульового проводу (\dot{I}_N).

За позитивний напрям струмів в лінійних проводах приймається напрям від джерела до навантаження, а в нейтральному проводі навпаки – від навантаження до джерела.

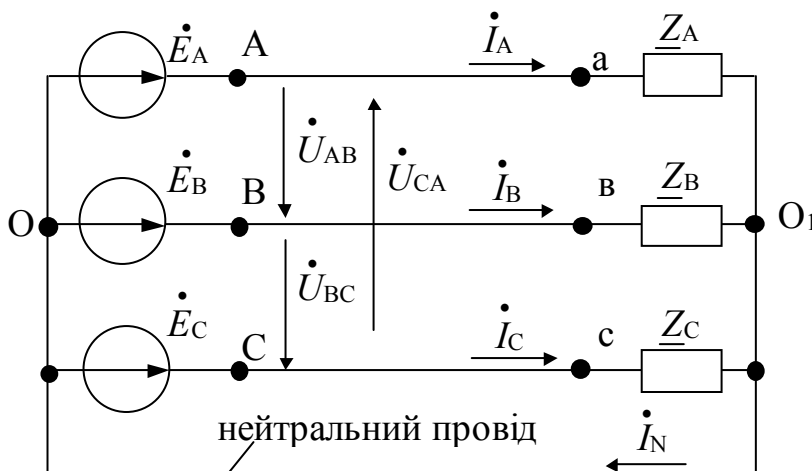


Рис. 3.8 – З'єднання за типом "зірка-зірка" з нейтральним проводом

Струм в нейтральному проводі дорівнює геометричній сумі лінійних струмів (за першим законом Кірхгофа):

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (3.3)$$

3.2.2. З'єднання обмоток генератора та трифазного навантаження за типом "трикутник-трикутник", "зірка-трикутник"

Схема "трикутник-трикутник" характеризується тим, що обмотки і генератора і фазні навантаження з'єднано трикутником (рис. 3.9), а схема "зірка-трикутник" – тим, що обмотки генератора з'єднано зіркою, а фазні навантаження – трикутником (рис. 3.10).

За позитивний напрям лінійних струмів ($\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$) приймається напрям від джерела до навантаження. Позитивний напрям фазних струмів вибирають від точки "а" до точки "в" (струм $\dot{I}_{ав}$), від точки "в" до точки "с" (струм $\dot{I}_{вс}$), від точки "с" до точки "а" (струм $\dot{I}_{са}$).

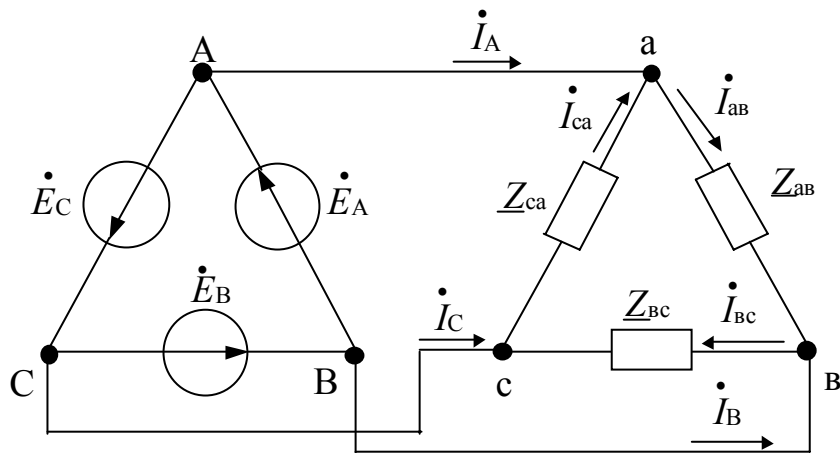


Рис. 3.9 – З'єднання за типом "трикутник-трикутник"

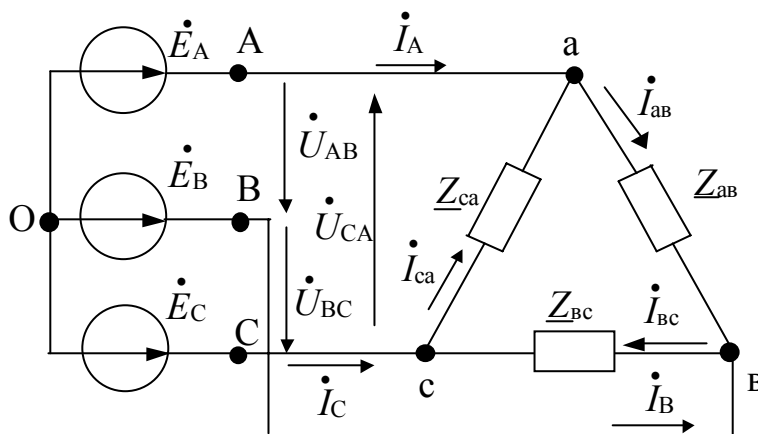


Рис. 3.10 – З'єднання за типом "зірка-трикутник"

3.3. Розрахунок трифазних кіл

Трифазні кола є різновидом кіл синусоїдного струму і тому їх розрахунок та дослідження здійснюють за допомогою ти ж самих методів, що розглядалися раніш. Вважаємо, що трифазна ЕРС – симетрична.

3.3.1. Коло "зірка-зірка"

3.3.1.1. Несиметричне навантаження ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$), коло з нейтральним проводом

За несиметричного навантаження, коли в нейтральному проводі є опір Z_N (рис. 3.11), потенціали точок О та О₁ не дорівнюють один одному. Розрахунок кола здійснюють в наступній послідовності:

- визначають напругу зміщення нейтралі, тобто напругу \dot{U}_{O_1O} , за виразом, що витікає з методу двох вузлів:

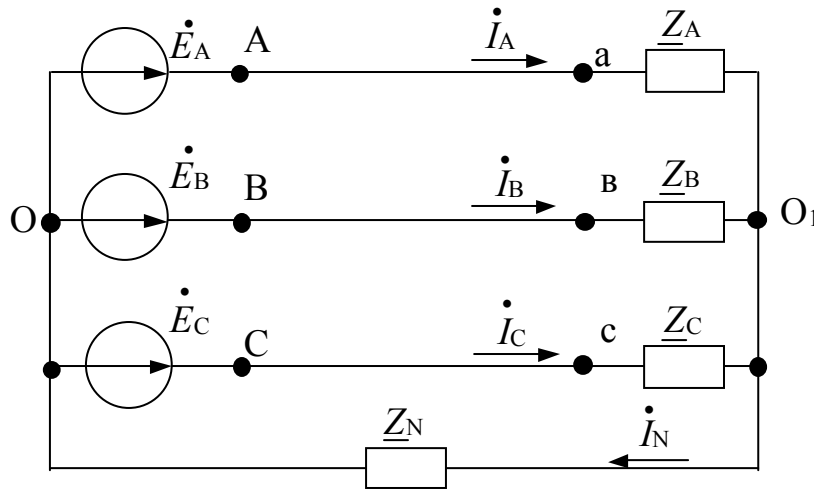


Рис. 3.11 – До розрахунку трифазного кола "зірка-зірка" з нейтральним проводом

$$\dot{U}_{O_1O} = \frac{\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (3.4)$$

де $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C, \underline{Y}_N$ - комплекси фазних провідностей та провідності нейтрального проводу:

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}, \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}, \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}, \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}; \quad (3.5)$$

- визначають фазні напруги на навантаженні:

$$\dot{U}_{aO_1} = \dot{E}_A - \dot{U}_{O_1O}; \dot{U}_{bO_1} = \dot{E}_B - \dot{U}_{O_1O}; \dot{U}_{cO_1} = \dot{E}_C - \dot{U}_{O_1O}; \quad (3.6)$$

- визначають фазні струми:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{aO_1} \cdot \underline{Y}_A; \dot{I}_B = \dot{U}_{bO_1} \cdot \underline{Y}_B; \dot{I}_C = \dot{U}_{cO_1} \cdot \underline{Y}_C. \quad (3.7)$$

Струм в нейтральному проводі \dot{I}_N визначають як суму фазних струмів (3.3).

Коли в нейтральному проводі опір \underline{Z}_N відсутній і навантаження несиметричне (рис.3.8), $\dot{U}_{O_1O} = 0$, тому фазні струми:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{AO} \cdot \underline{Y}_A; \dot{I}_B = \dot{U}_{BO} \cdot \underline{Y}_B; \dot{I}_C = \dot{U}_{CO} \cdot \underline{Y}_C, \quad (3.8)$$

а струм нейтрального проводу визначають, як і в попередньому випадку, за виразом (3.3).

3.3.1.2. Несиметричне навантаження ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$), коло без нейтрального проводу

Якщо навантаження несиметричне та нульовий провід відсутній (рис.3.7), фазні струми установлюються таким чином, що їх сума дорівнює нулю. Внаслідок чого відбувається, як і в випадку несиметричного навантаження за наявності в нейтральному проводі опора \underline{Z}_N , викривлення симетрії фазних напруг так, що фаза з меншим навантаженням опиняється під зниженою напругою, а фаза з більшим навантаженням – під підвищеною напругою в

порівнянні з номінальною фазною напругою. Потенціали точок О та О₁ не дорівнюють один одному. Розрахунок кола здійснюють так:

- визначають напругу зміщення нейтралі, тобто напругу \dot{U}_{O_1O} :

$$\dot{U}_{O_1O} = \frac{\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad (3.9)$$

- визначають фазні напруги на навантаженні за виразами (3.6);
- визначають фазні струми за виразами (3.7).

3.3.1.3. Симетричне навантаження ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$)

За симетричного навантаження в усіх випадках, що відповідають схемам рис. 3.7, рис. 3.8, рис. 3.11, потенціали точок О та О₁ дорівнюють один одному, тобто:

$$\dot{U}_{O_1O} = \frac{\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = \frac{\underline{Y}_A \cdot (\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C)}{3 \cdot \underline{Y}_A + \underline{Y}_N} = 0. \quad (3.10)$$

Тоді фазні струми визначають за виразами (3.7) і вони однакові за модулем та зсунуті за фазою на 120°. Струм нульового проводу – $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

3.3.2. Кола “трикутник-трикутник” та “зірка-трикутник”

3.3.2.1. Кола “трикутник-трикутник” та “зірка-трикутник” без урахування опорів підвідних проводів

Взагалі розрахунок кіл “трикутник-трикутник” (рис. 3.9) та “зірка-трикутник” (рис. 3.10) відрізняються тільки значенням напруги на фазних навантаженнях ($\dot{U}_{\text{ф.навантаження}}$): у випадку кола “трикутник-трикутник” – $\dot{U}_{\text{ф.навантаження}} = \dot{U}_{\text{ф.генератора}}$, а у випадку кола “зірка-трикутник” – $\dot{U}_{\text{ф.навантаження}} = \dot{U}_{\text{лінійне генератора}} = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\text{ф}} \cdot \angle 30^\circ$. Далі будемо розглядати коло “зірка-трикутник”, розрахунок якого проводять в наступній послідовності:

- комплекси фазних струмів визначають за виразами:

$$\dot{I}_{\text{ав}} = \frac{\dot{U}_{\text{AB}}}{\underline{Z}_{\text{ав}}} = \dot{U}_{\text{AB}} \cdot \underline{Y}_{\text{ав}}; \quad \dot{I}_{\text{вс}} = \frac{\dot{U}_{\text{BC}}}{\underline{Z}_{\text{вс}}} = \dot{U}_{\text{BC}} \cdot \underline{Y}_{\text{вс}}; \quad \dot{I}_{\text{са}} = \frac{\dot{U}_{\text{CA}}}{\underline{Z}_{\text{са}}} = \dot{U}_{\text{CA}} \cdot \underline{Y}_{\text{са}}, \quad (3.11)$$

де $\dot{U}_{\text{AB}}, \dot{U}_{\text{BC}}, \dot{U}_{\text{CA}}$ – лінійні напруги;

$\underline{Y}_{\text{ав}}, \underline{Y}_{\text{вс}}, \underline{Y}_{\text{са}}$ – комплекси фазних провідностей:

$$\underline{Y}_{\text{ав}} = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{ав}}}; \quad \underline{Y}_{\text{вс}} = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{вс}}}; \quad \underline{Y}_{\text{са}} = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{са}}}. \quad (3.12)$$

Лінійні струми визначають за першим законом Кірхгофа для вузлів а, в, с:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{\text{ав}} - \dot{I}_{\text{са}}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{\text{вс}} - \dot{I}_{\text{ав}}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{\text{са}} - \dot{I}_{\text{вс}}. \quad (3.13)$$

При симетричному режимі фазні струми в усіх фазах однакові і зсунуті відносно своєї фазної напруги на однаковий кут, що визначається співвідношенням:

$$\varphi = \arctg \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}}, \quad (3.14)$$

де X_{ϕ} – реактивний опір навантаження,
 R_{ϕ} – активний опір навантаження.

Лінійні струми при цьому за модулем будуть рівними між собою в $\sqrt{3}$ разів більшими, ніж фазні струми, а за фазою будуть відставати на кут 30° при прямому чередуванні фаз, тобто:

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{ab} \angle -30^\circ; \quad \dot{I}_B = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{bc} \angle -30^\circ; \quad \dot{I}_C = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{ca} \angle -30^\circ. \quad (3.15)$$

Таким чином, при симетричному навантаженні фаз розрахунок трифазного кола можна звести до розрахунку однієї фази.

При несиметричному навантаженні лінійні струми можуть бути більшими чи меншими, ніж фазні струми.

3.3.2.2. Кола “трикутник-трикутник” та “зірка-трикутник” з урахуванням опорів підвідних проводів

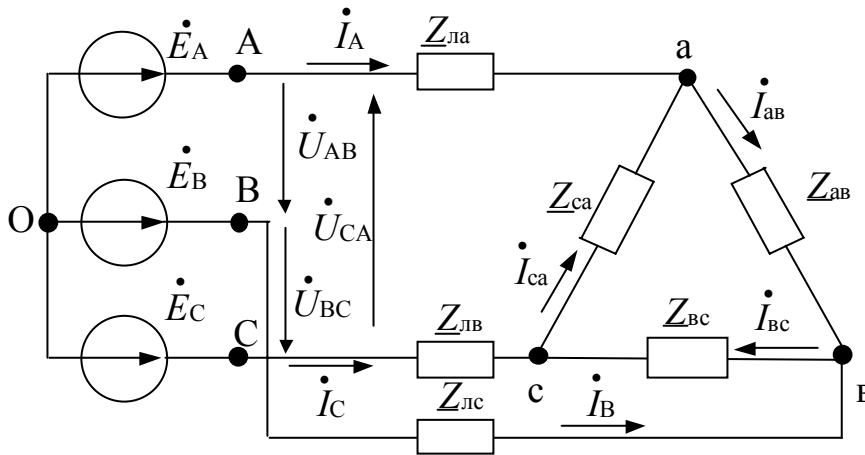


Рис. 3.12 – До розрахунку кола "зірка-трикутник"

Розглянемо загальний випадок такого кола, коли опори в лініях не дорівнюють один одному ($Z_{ла} \neq Z_{лв} \neq Z_{лс}$) і навантаження фаз несиметричне (рис.3.12). Розрахунок такої схеми слід виконувати шляхом заміни трикутника опорів еквівалентною зіркою. Опори променів зірки:

$$\underline{Z}'_a = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \quad \underline{Z}'_b = \frac{\underline{Z}_{bc} \cdot \underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \quad \underline{Z}'_c = \frac{\underline{Z}_{ca} \cdot \underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}. \quad (3.16)$$

Якщо навантаження фаз симетричне, тобто $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_{\phi}$, то опір променів еквівалентної зірки:

$$\underline{Z}'_a = \underline{Z}'_b = \underline{Z}'_c = \frac{\underline{Z}_{\phi}}{3}. \quad (3.17)$$

У результаті перетворення одержуємо еквівалентну схему, зображену на рис. 3.13, яка в загальному випадку розраховується як схема "зірка-зірка" при несиметричному навантаженні:

- визначають повні опори ($\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$) та провідності ($\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$) кожної фази, враховуючи що опори з'єднувальних проводів ввімкнені послідовно з опорами відповідних променів еквівалентної зірки:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_A &= \underline{Z}'_a + \underline{Z}_{ла}; \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \\ \underline{Z}_B &= \underline{Z}'_b + \underline{Z}_{лв}; \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}; \\ \underline{Z}_C &= \underline{Z}'_c + \underline{Z}_{лс}; \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}.\end{aligned}\quad (3.18)$$

- визначають напругу зміщення нейтралі \dot{U}_{O_1O} за формулою (3.9) та лінійні струми за формулою

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{aO_1} \cdot \underline{Y}_A; \dot{I}_B = \dot{U}_{bO_1} \cdot \underline{Y}_B; \dot{I}_C = \dot{U}_{cO_1} \cdot \underline{Y}_C. \quad (3.19)$$

Фазні струми в навантаженнях $\underline{Z}_{ав}; \underline{Z}_{вс}; \underline{Z}_{са}$ вихідної схеми (рис. 3.12) визначають за законом Ома:

$$\dot{I}_{ав} = \frac{\dot{U}_{ав}}{\underline{Z}_{ав}}; \quad \dot{I}_{вс} = \frac{\dot{U}_{вс}}{\underline{Z}_{вс}}; \quad \dot{I}_{са} = \frac{\dot{U}_{са}}{\underline{Z}_{са}}, \quad (3.20)$$

де $\dot{U}_{ав}, \dot{U}_{вс}, \dot{U}_{са}$ – напруги на фазних навантаженнях:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ав} &= \dot{U}_{aO_1} - \dot{U}_{bO_1} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}'_a - \dot{I}_B \cdot \underline{Z}'_b; \\ \dot{U}_{вс} &= \dot{U}_{bO_1} - \dot{U}_{cO_1} = \dot{I}_B \cdot \underline{Z}'_b - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}'_c; \\ \dot{U}_{са} &= \dot{U}_{cO_1} - \dot{U}_{aO_1} = \dot{I}_C \cdot \underline{Z}'_c - \dot{I}_A \cdot \underline{Z}'_a.\end{aligned}\quad (3.21)$$

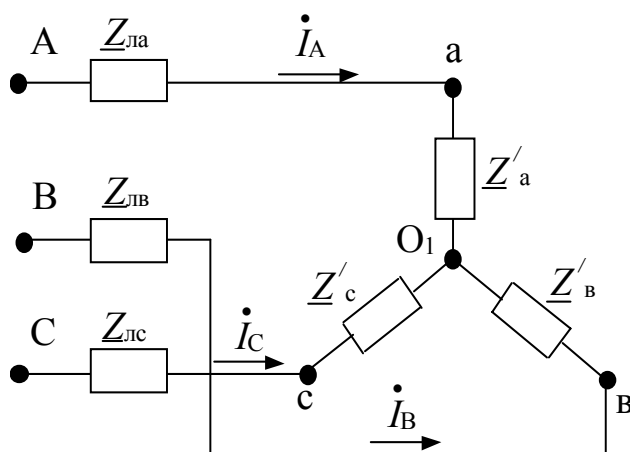


Рис. 3.13 – Вихідна схема після еквівалентної заміни трикутника на зірку

3.4. Аварійні режими в трифазних колах

3.4.1. Схема "зірка-зірка"

Обрив лінійного проводу в колі "зірка-зірка" з нейтральним проводом.

В цьому випадку (рис. 3.14) $I_A=0$, фазні струми I_B і I_C залишаються тими ж, що і в колі "зірка-зірка", тобто:

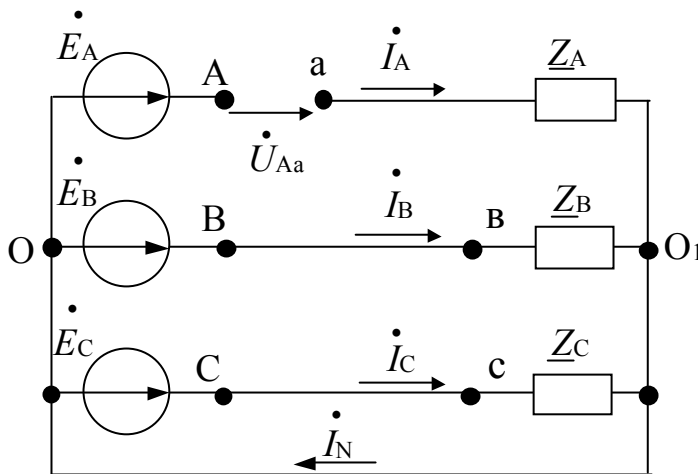


Рис. 3.14 – Обрив лінійного проводу в колі "зірка-зірка" з нейтральним проводом

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BO}}{Z_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CO}}{Z_C}.$$

Струм в нульовому проводі:
 $\dot{I}_N = \dot{I}_B + \dot{I}_C$. Фазні напруги на навантаженні:

$$\dot{U}_{aO_1} = 0, \quad \dot{U}_{bO_1} = \dot{U}_{BO},$$

$\dot{U}_{cO_1} = \dot{U}_{CO}$; напруга на затискачах розриву дорівнює фазній напрузі: $\dot{U}_{Aa} = \dot{U}_{AO}$.

- Обрив лінійного проводу в схемі "зірка-зірка" без

нейтрального проводу (в схемі рис. 3.14 треба вимкнути нейтральний провід).

В цьому випадку лінійна напруга U_{BC} прикладається до послідовного з'єднання двох опорів Z_B і Z_C ; та якщо $Z_B = Z_C$ вона (напруга) рівномірно розподіляється між цими опорами.

Струми:

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_B + Z_C}, \quad (3.22)$$

Напруга на затискачах розриву дорівнює:

$$\dot{U}_{Aa} = \dot{I}_B \cdot Z_B - \dot{E}_B + \dot{E}_A = \dot{U}_{AB} + \dot{I}_B \cdot Z_B, \quad (3.23)$$

і якщо $Z_B = Z_C$, то $\dot{U}_{Aa} = 1,5 \cdot \dot{U}_{AO}$. Напруга зміщення нейтралі:

$$\dot{U}_{O_1O} = \dot{U}_{BO} - \dot{I}_B \cdot Z_B, \quad (3.24)$$

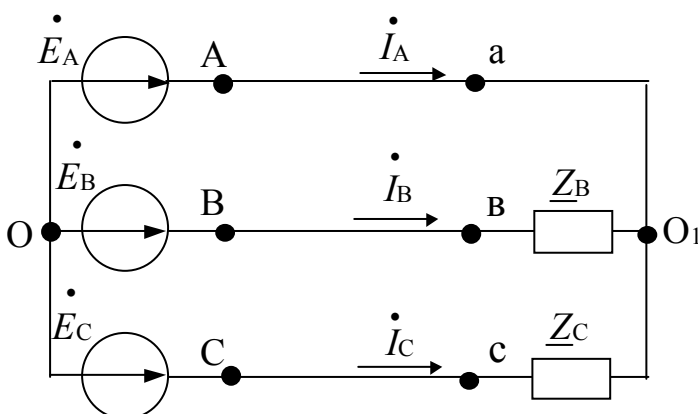


Рис. 3.15 – Коротке замикання у фазі A

Коротке замикання у фазі A (схема "зірка-зірка" без нульового проводу) – рис. 3.15.

Напруга зміщення нейтралі:
 $\dot{U}_{O_1O} = \dot{E}_A$. Напруги на навантаженні:

$$\dot{U}_{aO_1} = 0,$$

$$\dot{U}_{bO_1} = \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{O_1O},$$

$$\dot{U}_{cO_1} = \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{O_1O}.$$

Фазні струми:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BO_1}}{\underline{Z}_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CO_1}}{\underline{Z}_B}, \quad \dot{I}_A = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C). \quad (3.25)$$

3.4.2. Схема "зірка-трикутник"

Обрив лінійного проводу у фазі А (рис. 3.16)

При обриві одного з лінійних проводів, наприклад у фазі "А", режим роботи схеми змінюється. Опір фази \underline{Z}_{BC} буде, як і раніше, знаходитись під нормальною лінійною напругою \dot{U}_{BC} , тому струм \dot{I}_{BC} у цій фазі не зміниться. Опори фаз \underline{Z}_{CA} і \underline{Z}_{AB} виявляться послідовно з'єднаними та підключеними до тієї ж лінійної напруги \dot{U}_{BC} . Якщо $\underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{AB}$, то напруга \dot{U}_{BC} розподіляється між ними порівну і кожен з опорів опиниться під напругою $0.5 \cdot \dot{U}_{BC}$. Якщо $\underline{Z}_{CA} \neq \underline{Z}_{AB}$, то напруга \dot{U}_{BC} розподілиться прямо пропорційно значеннями цих опорів, при цьому в фазах "ав" і "са" протікатиме один і той же струм:

$$\dot{I}_{ав} = \dot{I}_{са} = \frac{-\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{ав} + \underline{Z}_{са}}. \quad (3.26).$$

Лінійні струми визначаються так:

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_C = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_A = 0. \quad (3.27)$$

При обриві одного з фазних проводів, наприклад, у фазі "вс" (рис. 3.16), фазний струм $\dot{I}_{BC} = 0$, струми \dot{I}_{CA} та \dot{I}_{AB} залишаються без змін. Тому лінійний струм $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$ зберігає своє значення, а лінійні струми \dot{I}_B та \dot{I}_C змінюються: $\dot{I}_B = -\dot{I}_{AB}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA}$. Таким чином, зміна навантаження в одній з фаз зумовлює одночасну зміну двох лінійних струмів і не впливає на значення фазних напруг, на значення струмів двох інших фаз, і також не впливає на значення третього лінійного струму.

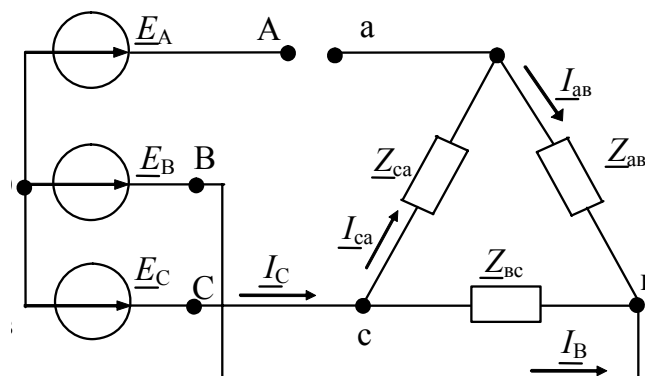


Рис. 3.16 – Обрив лінійного проводу у фазі А при з'єднанні "зірка-трикутник"

РОЗДІЛ 4. ТРАНСФОРМАТОРИ

4.1 Принцип дії та конструкція трансформатора

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного із феромагнітного матеріалу (зазвичай, це електротехнічна сталь) і двох обмоток розташованих на стрижнях 1 магнітопроводу (рис. 4.1, а).

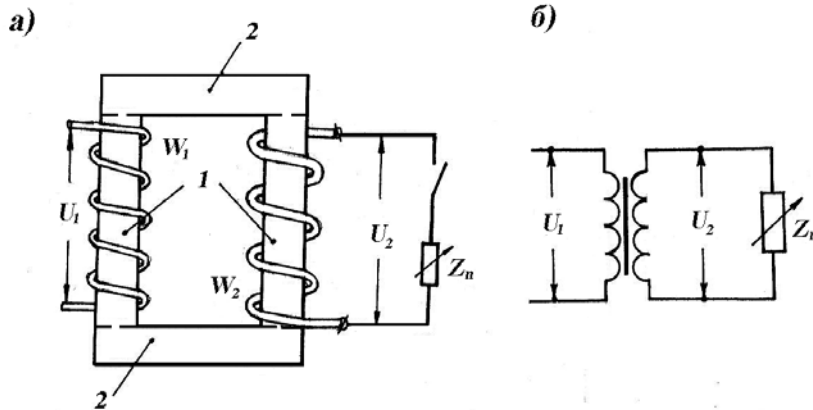


Рис. 4.1 – Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми трансформатора

Стрижні магнітопроводу з'єднуються між собою ярмами 2. На (рис. 4.1, б) показано однофазний трансформатор в електричних схемах.

Обмотка, що вмикається до мережі, з

напругою U_1 (число витків її позначається W_1) називається *первинною*, а обмотка, W_2 , до якої підмикається навантаження Z_H – *вторинною*.

Електричний зв'язок між обмотками W_1 , та W_2 відсутній і потужність від однієї обмотки до другої передається лише за рахунок електромагнітного зв'язку.

Дія трансформатора основана на явищі електромагнітної індукції: якщо обмотка перетинається змінним магнітним полем, то в її витках створюється е.р.с. Фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі, при підімкненні його до мережі, можна зобразити схемою (рис. 4.2).



Рис. 4.2 – Схема до пояснення принципу дії трансформатора

При підмиканні до мережі з напругою U_1 первинної обмотки W_1 її витками протікає струм I_1 і створює намагнічуючу силу $F_1 = I_1 W_1$. В магнітній системі трансформатора з магнітним опором R_M виникає потік $\Phi_1 = F_1 / R_M$. Цей потік в часі змінюється за синусоїдним законом, як і напруга мережі, а в просторі осердя трансформатора пульсує, і перетинає витки первинної та вторинної обмоток W_1 та W_2 , створюючи в них е.р.с

Сучасний силовий трансформатор – це досить складний пристрій, що має значну кількість різних конструктивних елементів: магнітопровід, обмотки, вводи, бак та ін. Магнітопровід із насадженими на стержні обмотками складає *активну частину* трансформатора. Решту елементів називають *допоміжними* (неактивними).

Розглянемо більш детально конструкцію основних частин трансформатора.

Магнітопровід. Магнітопровід у трансформаторі виконує подвійну функцію: по-перше, він складає магнітне коло, по якому замикається магнітний потік, а по-друге, на ньому кріпляться обмотки, відводи, перемикачі та інші деталі і вузли.

Як уже зазначалось, магнітопровід складається із стержнів і ярем. Він має *шихтовану конструкцію*, тобто набирається із окремих пластин електротехнічної сталі товщиною 0,35-0,5мм, ізолюваних одна від іншої ізоляційною плівкою. Така конструкція дозволяє знизити втрати від вихрових струмів, а якість сталі – від гістерезису, що, в кінцевому результаті, підвищує к.к.д. трансформатора.

В сучасних трансформаторах використовується *шихтована конструкція* магнітних систем з *косими* та з *комбінованими* (частково *прямі*, частково *косими*) стиками, що дозволяє знизити втрати в стиках. Стержні системи опресовуються і стягуються *скло-бандажами*, а ярма – спеціальними *балками* та металевими *напівбандажами*.

Обмотки. Обмотки трансформаторів виконують із обмоткових дротів круглого чи прямокутного перерізу, ізолюваних *бавовняною пряжею* або *кабельним папером*. Як правило, обмотки намотуються на *паперово-бакелітові* циліндри і насаджуються *концентрично* одна на другу на стрижень осердя, при цьому, для зниження ізоляційних проміжків, обмотка НН розташовується безпосередньо на стрижні, а обмотка ВН – на ній, зовні.

В залежності від номінального струму та класу напруги, обмотки трансформаторів бувають *циліндричні одно-, дво- та багатоходові*, а також, *безперервні обмотки*. Ці дві обмотки можуть використовуватись і як ВН, і як НН, а *гвинтові* – лише, як обмотки НН зі значними струмами.

Як відомо, за способом охолодження трансформатори поділяють на сухі (охолоджуються *навколишнім повітрям*) та масляні (охолоджуються *трансформаторним маслом*). У останніх активна частина поміщається в бак, заповнений трансформаторним маслом. Трансформаторне масло, маючи кращу теплопровідність ніж повітря, служить для відводу тепла від активної частини трансформатора. Крім цього, трансформаторне масло, як гарний діелектрик, забезпечує високу електричну міцність, а отже, більш надійну роботу трансформатора. У трансформаторів незначної потужності до 20-30 кВА застосовують баки з гладкими стінками. У більш потужних – трубчаті баки, або баки з *навісними радіаторами*. Це збільшує поверхню охолодження і дозволяє знизити габарити трансформатора. На *кришці* бака розташовують:

- *виводи ВН та НН* для з'єднання обмоток трансформатора з мережею та навантаженням;

- *перемикач*, призначений для ступінчатої зміни числа витків в обмотці, як правило, ВН;

- *розширювач*, яким компенсується об'єм масла при зміні температури і зменшується площа дотику масла до повітря;

- *масловказівник* – скляна трубка, що з'єднана обома кінцями з розширювачем і вказує на рівень масла при фіксованій температурі;

- *газове реле* призначене для подачі сигналу і відмикання трансформатора від мережі при аварійних режимах, що супроводжуються виділенням газу з масла; з цією метою газове реле має дві пари контактів, розміщених в спеціальних поплавках;

- *викидна труба* забезпечує захист трансформаторів, потужність яких 1000 кВА і більше, від розривання бака при зростанні тиску в середині у аварійних випадках; з цією метою викидна труба закінчується *фланцем* зі скляним *диском*, який лопається при зростанні тиску;

- *візок* прикріплюється до дна бака і забезпечує переміщення трансформатора в межах підстанції.

Характеристики трансформатора визначаються його *номінальними параметрами*:

- *номінальна первинна лінійна напруга* $U_{1ном}$, В або кВ;

- *номінальна вторинна напруга* (номінальною вторинною напругою є напруга при відімкненому навантаженні, тобто, при НХ) $U_{2ном}$, В або кВ;

- *номінальні лінійні струми* у первинній $I_{1ном}$ і вторинній $I_{2ном}$ обмотках, А;

- *номінальна повна потужність* $S_{ном}$ кВА (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном} = U_{2ном} I_{2ном}$, для трифазного – $S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} I_{1ном} = \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном} = 3U_{1ф}I_{1ф} = 3U_{2ф}I_{2ф}$).

Номінальні лінійні струми в паспорті трансформатора не вказані, тому їх для трифазного трансформатора визначають, як:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}}.$$

Кожен трансформатор може вмикатися лише до мережі змінного струму визначеної частоти. В Україні трансформатори загального призначення розраховані на частоту $f = 50$ Гц (у деяких країнах $f = 60$ Гц), в пристроях автоматики і зв'язку можуть застосовувати трансформатори на частоти 50, 400 або 1000 Гц.

4.2. Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів, паралельна робота трансформаторів

Трансформування трифазного струму можна здійснювати трьома однофазними трансформаторами, що утворюють *трансформаторну групу*, або одним трифазним трансформатором, на кожному з трьох стрижнів магнітної системи якого розташовано по дві обмотки, що створюють відповідно три фази.

Між собою обмотки фаз трансформаторної групи і трифазного трансформатора, з'єднуються за різними *схемами* та *групами*

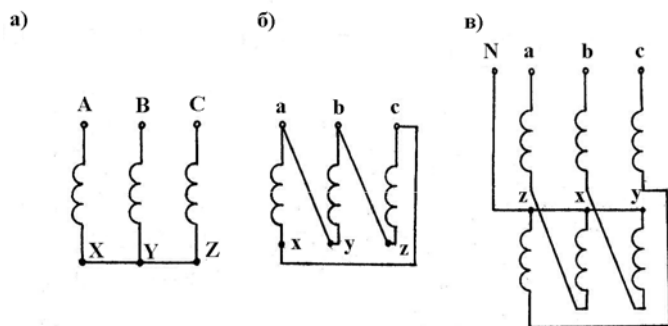


Рис. 4.3 – Схеми сполучення обмоток ВН в зірку (а) та в трикутник (б) і зигзаг (в) трансформатора

виконується від нульової точки сполучення – X, Y, Z; трикутник (рис. 4.3, б) та зигзаг (як правило, з нульовим виводом) (рис. 4.3, в).

Зірка (позначається літерою Y) – це таке сполучення, коли кінці обмоток з'єднують в загальну точку – нуль. З цієї точки може виконуватись нульовий вивід. При такому сполученні лінійні напруги більші від фазних в $\sqrt{3}$, а лінійні струми рівні фазним. Нагадаємо, що лінійні напруги – це напруги між фазами – U_{AB} ; U_{BC} ; U_{CA} , а фазні – між початком та кінцем фази – U_{AX} ; U_{BY} ; U_{CZ} (рис. 4.3, а).

Трикутник (позначається літерою Δ) – це схема, за якою початок попередньої фази з'єднують з кінцем наступної. В трикутнику лінійні та фазні напруги рівні, а лінійні струми більші від фазних в $\sqrt{3}$ раз. Нагадаємо, що лінійні струми – це струми, що підтікають до точок А, В, С а фазні – які з цих точок витікають (рис. 4.3, б).

Зигзаг (позначається літерою Z) – це схема, при сполученні за якою обмотка фази ділиться на дві частини. Кожна з них розміщується на різних стрижнях. Між собою ці частини вмикаються зустрічно, тому напруга фази виявляється в $\sqrt{3}$ більшою напруги кожної частини (рис. 4.3, в). Зигзаг називають рівноплечовим, якщо частини фази, що розміщені на різних стрижнях, рівні; і нерівноплечовим – якщо частини різні.

Схеми з'єднання обмоток трансформаторів позначають як дріб (Y/Y, Y/Δ і т.п.) Чисельник цього дробу позначає схему сполучення обмотки ВН, а знаменник – обмотки НН. При виборі схеми з'єднання обмоток враховують ряд обставин. За високих напруг перевагу віддають схемі сполучення зірка з заземленням нульової точки, що дозволяє знизити напругу проводів лінії електропередач відносно землі в $\sqrt{3}$ раз і знизити вартість ізоляції. Обмотки НН з'єднують в зірку і виводять нульовий вивід (позначається Y₀) у тому випадку, коли необхідно жити змішане навантаження, наприклад, освітлення, яке вмикають на фазу і нуль та трифазні двигуни, що, зазвичай, вмикають на лінійну напругу трьох фаз.

Якщо напруга обмотки НН вище 400 В, перевагу віддають схемі сполучення трикутник, бо при цьому покращуються умови роботи

Затискачі обмоток трансформаторів позначають літерами латинського алфавіту: початки обмоток першими, а кінці останніми; при цьому, обмотка ВН позначається великими літерами А, В, С, Х, У, Z, а обмотка НН малими а, в, с, х, у, z (рис. 4.3).

Між собою обмотки фаз трифазних трансформаторів з'єднують за такими схемами: зірка (рис. 4.3, а); зірка з нульовим виводом (вивід

трансформатора при несиметричному навантаженні і знижується вплив несинусоїдності напруги.

Схема сполучення зигзаг використовується в спеціальних трансформаторах, що працюють з напівпровідниковими випрямлячами або інверторами. Слід зазначити, що такі схеми вимагають в $2/\sqrt{3}$ раз більших затрат обмоткового дроту в порівнянні зі схемою зірка.

В паспорті трансформатора після схеми сполучення обмоток вказують через дефіс цифру, що позначає групу сполучення ($Y/Y-0$; $Y/\Delta-11$). Під групою сполучення обмоток розуміють кут, на який лінійний вектор е.р.с. обмотки НН $E_{НН}$ відстає від однойменного вектора обмотки ВН $E_{ВН}$.

У однофазного трансформатора фазні е.р.с. будуть одночасно і лінійними, тому е.р.с. обмоток ВН та НН або співпадають по фазі, якщо обмотки намотані однаково і мають однакове найменування затисків (рис. 4.4, а), або будуть у

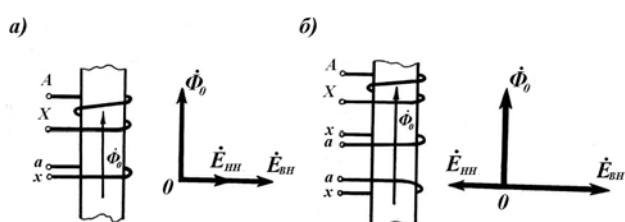


Рис. 4.4 – Схеми та векторні діаграми потоків і е.р.с. до визначення груп сполучення трансформаторів

протифазі при різних намотках обмоток, чи не однойменному маркіруванні (рис. 4.4, б).

У відповідності до цього для однофазних трансформаторів визначають і дві групи з'єднання – 0 , якій відповідає кут в 0^0 і 6 – кут в 180^0 , тобто групі відповідає кут $n \times 30^0$, де n – номер групи.

Для розрахунку групи прийнято користуватись циферблатом стрілочного годинника: велику стрілку, яка вважається лінійним вектором обмотки ВН, ставлять на цифру 12, тоді номер групи вкаже мала стрілка – лінійний вектор е.р.с. обмотки НН. Для трифазних трансформаторів, на відміну від однофазних, можна отримати (змінюючи не лише напрям намотки, чи назву затисків, а і схеми сполучення обмоток) 12 різних груп: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. При цьому парні групи будуть при однакових схемах сполучення (Y/Y ; Δ/Δ), а непарні при різних (Y/Δ ; Δ/Y).

Щоб визначити яку групу сполучення має трифазний трансформатор при заданих схемах з'єднання, необхідно побудувати векторно-потенційну діаграму е.р.с. його обмоток. Для зручної взаємної орієнтації векторів е.р.с. обмоток ВН та НН два будь-які затисків цих обмоток (наприклад, A та a) вважають електрично з'єднаними. При дослідному визначенні дійсно з'єднують електрично точки a і A .

На (рис. 4.5, а) подана схема сполучення Y/Y, а на (рис. 4.5, б) векторно-потенційна діаграма, на якій, у відповідності до з'єднаних затискачів A та a , точки A і a суміщені. Оскільки обмотки AX та ax розташовані на одному стрижні осердя трансформатора, то їхні відповідні фазні вектори E_{AX} і E_{ax} співпадають. Нульова точка $x; y; z$ обмотки НН буде розташована на векторі E_{AX} , а вектор E_{by} , що відкладається з цієї точки, буде паралельним вектору E_{BY} і закінчиться на лінійному векторі E_{BA} , тому лінійний вектор E_{ba} співпадає з лінійним вектором E_{BA} (кут $\alpha = 0$). Отже, це нульова група.

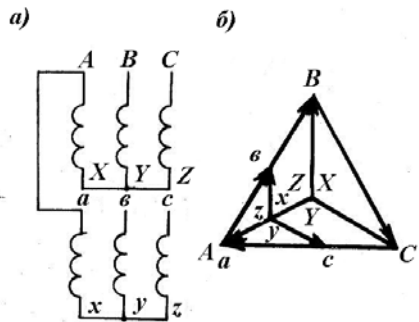


Рис. 4.5 – Схема сполучення Y/Y (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

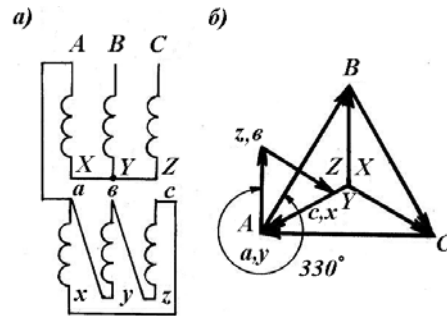


Рис. 4.6 – Схема сполучення Y/Δ (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

На (рис. 4.6) зображені схема сполучення Y/Δ, та векторно-потенційна діаграма, що відповідає цій схемі. Затискачі A і a обмоток ВН та НН з'єднані – на діаграмі це точка $(A; a; y)$, оскільки a та y з'єднані в трикутнику обмотки НН. Вектор E_{by} відкладають паралельно фазному вектору E_{BY} , бо обмотки BY та by розташовані на одному стрижні і мають однакову намотку та однакове найменування затискачів, відповідно до (рис. 4.5, а). Таким чином, лінійний вектор E_{ab} (він одночасно є і E_{by}) відстає від одноіменного вектора E_{AB} на кут 330° , а отже, це одинадцята група.

Як уже відзначалось, зміна назви затискачів обмотки, чи напрямку намотки,

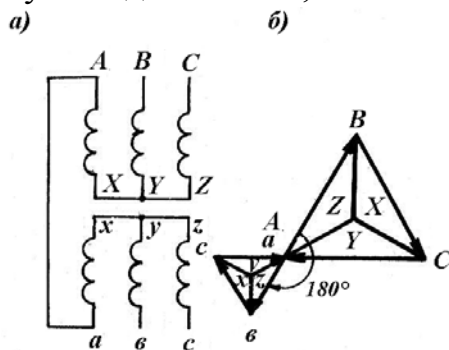


Рис. 4.7 – Схема сполучення Y/Y-6 (а) та векторно-потенційна діаграма (б) цього сполучення

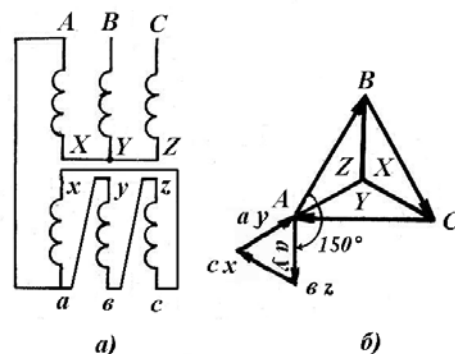


Рис. 4.8 – Схема сполучення обмоток Y/Δ -5 (а) та відповідна векторно-потенційна діаграма (б)

приведе до повороту фазного вектора даної обмотки е.р.с. на кут 180^0 , а отже, щоб з нульової групи отримати шосту, а з одинадцятої – п'яту, необхідно змінити назву затискачів обмотки НН *a* на *x*, *b* на *y*, *c* на *z* і навпаки (рис. 4.7 та рис. 4.8).

Розглянуті вище групи отримують не змінюючи назву затискачів між стрижнями, тому ці чотири групи сполучення називають *основними*. Якщо ж змінювати назви затискачів між стрижнями, можна отримати решту груп, які називають *похідними*.

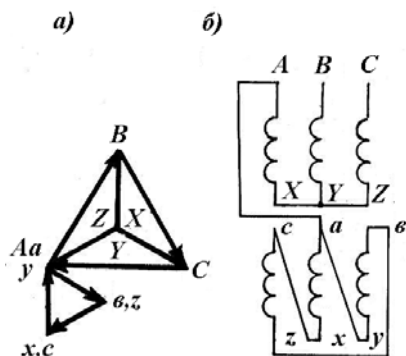


Рис. 4.9 – Векторно-потенційна діаграма (а) та схема сполучення обмоток Y/Δ -3 (б) трифазного трансформатора

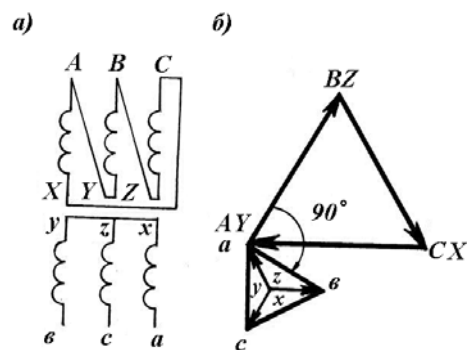


Рис. 4.10 – Схема сполучення обмоток Δ/Y-3 (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

Розглянемо принцип побудови похідної групи. Наприклад, необхідно з'єднати трансформатор за третьою групою. Оскільки група 3 непарна, то схеми сполучення обмоток ВН та НН повинні бути різні: Y/Δ-3, або Δ/Y-3. Щоб провести з'єднання затискачів обмоток, спершу будують векторно-потенційну діаграму (рис. 4.9, а), на якій E_{ab} відкладають під кутом $3 \times 30^0 = 90^0$ до вектора E_{AB} , тобто повертають трикутник *abc* за годинниковою стрілкою, відносно трикутника *ABC*, на кут 90^0 . В результаті такого повороту фазні вектори е.р.с. обмотки НН стали паралельними фазним векторам обмотки ВН інших фаз: так вектор E_{ax} паралельний вектору E_{BY} ; E_{by} - E_{CZ} ; E_{cz} - E_{AX} . На (рис. 4.9, б), у відповідності до цього позначені і з'єднані затискачі обмотки НН. Аналогічно чинять і при схемі Δ/Y-3 (рис. 4.10).

Основні групи мають перевагу перед похідними, оскільки передбачають одноіменне маркування затискачів обмоток, що розташовані на одному стрижні, а це, в свою чергу, зменшує вірогідність помилки при монтажі схеми. Слід також відзначити, що на групу з'єднання зважають лише при паралельній роботі трансформаторів.

Паралельною називають таку роботу двох, чи більше, трансформаторів, коли їх вторинні обмотки увімкнено на спільне навантаження. При цьому первинні обмотки можуть живитись як з однієї мережі (рис. 4.11, а), так і з різних (рис. 4.11 б).

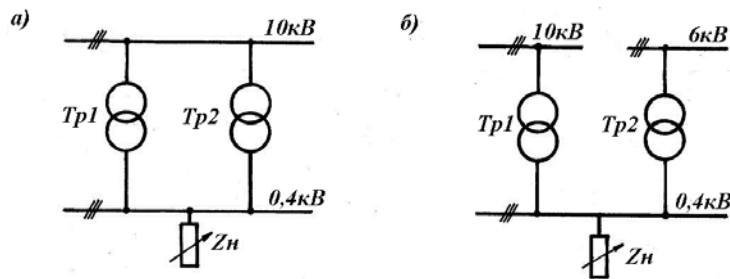


Рис. 4.11 – Схеми паралельної роботи трифазних трансформаторів з однією мережею живлення (а), та з двома (б)

Необхідність в паралельній роботі трансформаторів виникає у таких випадках:

- потужність навантаження більша за потужність одного трансформатора;
- споживач першої категорії, що не допускає перерви в електропостачанні, якщо така перерва пов'язана з виробничим браком чи з загрозою для здоров'я людей;
- різке коливання навантаження на протязі часу дозволяє вимкнути кілька паралельно-працюючих трансформаторів при зниженні навантаження, і тим самим підвищити експлуатаційні показники решти;
- коли необхідно вивести на поточний ремонт чи профілактику трансформатор, наприклад, дільничної підстанції, без перерви в електропостачанні дільниці.

Увімкнення на паралельну роботу трансформаторів можливе лише за дотримання певних умов.

По-перше, вторинні напруги паралельно-працюючих трансформаторів повинні бути однакові; якщо у них однакові і первинні напруги (рис. 4.11, а), то повинні бути рівні коефіцієнти трансформації: $K_I = K_{II} = K_n$.

По-друге, напруги КЗ трансформаторів, що працюють паралельно, повинні бути рівними: $u_{kI} = u_{kII} = u_{kn}$.

По-третє, паралельно-працюючі трансформатори повинні мати ідентичні схеми та групи з'єднання обмоток.

Крім цього, потужності трансформаторів, що вмикаються на паралельну роботу, не повинні відрізнятися більше ніж у три рази. Перед вмиканням трансформаторів на паралельну роботу їхні обмотки повинні бути сфазовані, що означає увімкнення однойменних затискачів усіх паралельно-працюючих трансформаторів лише на "свою" шину.

Якщо на паралельну роботу увімкнено два, чи більше, трансформаторів з ідеально виконаними умовами паралельної роботи, то навантаження між ними розподілиться пропорційно їх потужностям.

На практиці, підібрати кілька трансформаторів, що ідеально підходили б для паралельної роботи, досить складно. Тому допускаються деякі відхилення від вказаних вище умов.

4.3. Особливі види трансформаторів

4.3.1. Автотрансформатори

Автотрансформатором називається трансформатор, у якого обмотка нижчої напруги є частиною обмотки вищої напруги. На рис. 4.12. подана схема знижуючого трансформатора.

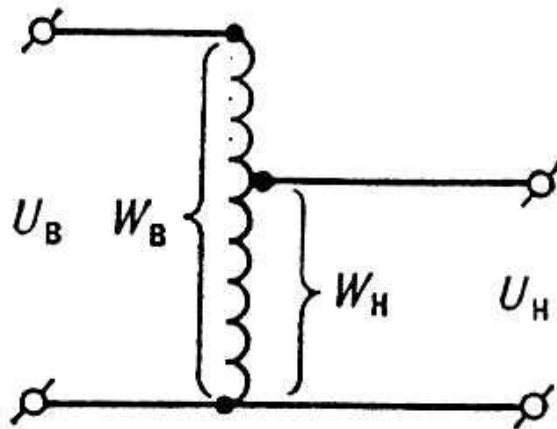


Рис. 4.12 – Схема автотрансформатора

Обмотка нижчої напруги (у даному випадку вторинна) має число витків $W_H = W_B - n$, обмотка вищої напруги – $W_B = W_H + n$. Тобто фактично є тільки одна обмотка.

Процес перетворення енергії в трансформаторі такий самий, як у звичайному трансформаторі: основна її частина з первинного ланцюга у вторинну передається за допомогою магнітного поля.

Перевага автотрансформаторів:

1. Економія міді матеріалу обмоток. По-перше, замість двох обмоток одна, а, по-друге, частина обмотки може бути виконана більш тонким проводом, тому що по ній протікає різниця струмів.
2. Економія сталі магнітопроводу, бо деяка частина енергії передається у вторинне коло електричним шляхом.
3. Вище к.к.д.

Недолік автотрансформаторів один, але дуже істотний, перешкоджаючий у ряді випадків їхньому застосуванню – наявність електричного зв'язку між первинним і вторинним колами. Цей зв'язок може призвести до порушення вимог техніки безпеки.

Застосування автотрансформаторів визначається їхніми властивостями. Основне використання – на лініях електропередач при коефіцієнтах трансформації, близьких до одиниці, наприклад 220 кВ, 330 кВ і т.д. Часто

використовуються автотрансформатори в якості регульованих джерел малої потужності (типу РНО, РНТ, ЛАТР).

4.3.2. Зварювальні трансформатори

Зварювальні трансформатори призначені для живлення зварювального поста технологічним струмом. Слід зазначити, що якість зварювання при живленні від джерела постійного струму вища, але зварювання на змінному струмі знаходять широке застосування внаслідок простоти зварювального агрегату.

З боку технологічного процесу до джерела живлення (зварювального агрегату) пред'являються наступні вимоги:

1. Практична сталість вихідної напруги у широкому діапазоні робочих струмів.

2. Обмеження струму короткого замикання, бо в процесі зварювання трапляються моменти, коли електроди мають безпосередній контакт. Якщо при цьому не обмежити струм, то в деталях, що зварюються, утворюються раковини, а трансформатор може вийти з ладу. Для зварювального трансформатора ці вимоги в значній мірі суперечливі, тому що перше припускає жорсткість зовнішньої характеристики, а друге – зм'якшення її. Задовольнити обидві вимоги простими методами при живленні від джерела змінного струму не вдасться, тому на практиці виконується тільки друге. Найбільш часто для цієї мети застосовується вмикання у вторинний ланцюг дроселя, як правило, із регульованою індуктивністю.

Обмеження струму відбувається за рахунок падіння напруги на індуктивному опорі дроселя. Змінюючи значення індуктивності дроселя (за рахунок зміни повітряного зазору його сердечника), ми можемо регулювати режим зварювання – струм поста.

РОЗДІЛ 5. АСИНХРОННІ МАШИНИ

5.1. Принцип дії та конструкція асинхронних машин

Принцип дії асинхронного двигуна, оснований на взаємодії струму з магнітним полем, може бути поясненим за допомогою макета, що складається з електропровідного диску та підковоподібного магніту (рис. 5.1).

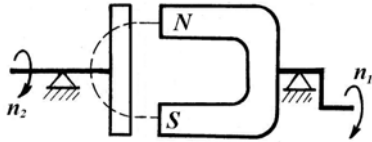


Рис. 5.1 – Макет асинхронного двигуна

Диск і магніт закріплено так, що вони можуть вільно обертатись. Якщо обертати підковоподібний магніт з частотою обертання n_1 , то його поле, перетинаючи електропровідний диск, індукує в ньому е.р.с. та струм. Взаємодія струму з полем призведе до появи електромагнітних сил (рис. 5.2), що будуть обертати диск у тому ж напрямі, в якому обертається магніт, але з меншою частотою обертання n_2 . Дійсно, як тільки частота обертання n_2 стає з якоїсь причини рівною n_1 – диск обертається синхронно з магнітом, магнітне поле перестає індукувати в диску е.р.с. і струми (отже, зникають електромагнітні сили, що обертають диск), тому останній почне гальмуватись і n_2 стане меншою від n_1 .

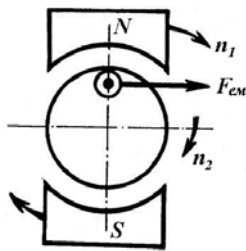


Рис. 5.2 – До визначення напрямку обертання асинхронного двигуна

Визначаючи напрям обертання ротора асинхронного двигуна, користуються правилами правої (визначають напрям е.р.с. і, відповідно, струму) та лівої (напрямок електромагнітної сили F_{em}) руки. При цьому слід пам'ятати, що відносно магнітного поля рух провідника зворотній: так на (рис. 5.2) магнітне поле обертається за годинниковою стрілкою, отже, провідник, по відношенню до поля, рухається проти годинникової стрілки (на рисунку не показано).

В реальному асинхронному двигуні кругове обертове поле, яке створює трифазна обмотка статора при живленні від мережі змінного струму, наводить е.р.с. та струми в замкненій обмотці ротора, що й призводить до появи електромагнітного моменту і обертання ротора.

Важливою величиною, що характеризує роботу асинхронного двигуна, є різниця між частотами обертання поля статора і ротора, виражена у відносних одиницях:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (5.1)$$

Ця величина називається *ковзанням*. Досить часто ковзання асинхронної машини виражають у процентах:

$$S = (n_1 - n_2) \cdot 100 / n_1 [\%]. \quad (5.2)$$

Статор електричної машини має досить просту конструкцію. Він складається з корпусу, осердя та статорної обмотки. Розглянемо конструкцію статора асинхронного двигуна потужністю до 100 кВт. Корпус такого двигуна виконують, як правило, литим із чавуна або сплавів алюмінію з ребристою поверхнею для збільшення площі охолодження. Необхідність у цьому виникає через магнітні втрати, що мають місце в осерді статора (в машині постійного струму такі втрати відсутні і тому її зовнішня поверхня не має ребер). Разом з корпусом відливаються лапи для кріплення машини на фундаменті (у деяких двигунів незначної потужності кріплення здійснюється за один з підшипникових щитків – *фланцеве кріплення*). Зовні на корпусі розташовують клемну коробку, в яку виводять кінці обмоток. У трифазних двигунів таких кінців, як правило, шість, що дає змогу з'єднати обмотки зіркою, чи трикутником (рис. 5.3).

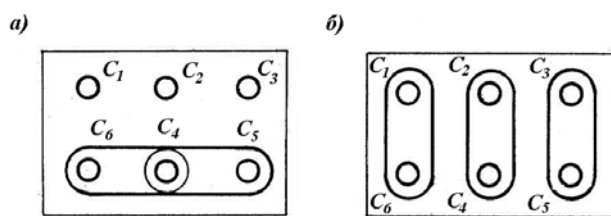


Рис. 5.3 – Розташування кінців статорних обмоток та сполучення їх в зірку (а) та трикутник (б) в клемній коробці

З боків корпус має спеціальні проточки для посадки підшипникових щитків, що також відливаються (матеріал корпусу і підшипникових щитків може бути різним: корпус – зі сплаву алюмінію, а підшипникові щитки – чавунні).

Осердя має циліндричну форму і шихтовану конструкцію,

тобто набирається із пластин електротехнічної гарячекатаної сталі товщиною 0,35 – 0,5 мм. Ці пластини виготовляють шляхом штамповки з подальшим двостороннім покриттям ізоляційною плівкою, наприклад, шаром лаку.

На внутрішній поверхні осердя статор має повздовжні пази, в які закладаються провідники обмотки статора.

Обмотка виконується з мідного (алюмінієвого) дроту круглого чи прямокутного перерізу.

Обмоткою статора машини змінного струму називається розімкнена система провідників, визначеним способом укладена в пази і з'єднана в фази.

Пази, в яких розміщують провідники обмотки, мають *трапецоїдну* чи *грушовидну форму* для машин потужністю до 100 Вт і *прямокутну* форму для машин більшої потужності (рис. 5.4).

Трапецоїдні та грушовидні пази з боку, зверненого до повітряного зазору, напівзакриті, що дозволяє знизити магніторушійну силу обмотки.

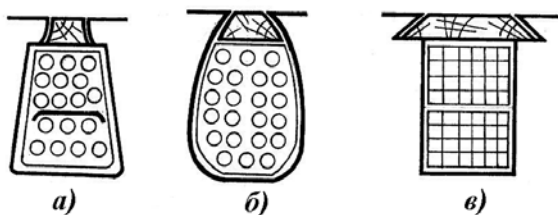


Рис. 5.4 – Пази статора машини змінного струму трапецоїдний (а), грушовидний (б) та прямокутний (в)

В машинах потужністю до 100 кВт виконують всипну обмотку з круглого ізолюваного дроту. Для ізоляції обмотки від корпусу в пази закладають вигнуті по формі пазу короби, що складаються з одного чи кількох шарів ізоляційного матеріалу.

Провідники по черзі опускають (всипають) в паз через щілину, яку створюють сусідні зубці. Після укладки обмотки в пази осердя, її просочують спеціальними лаками, що надає їй монолітної конструкції, покращує теплопровідність, вологостійкість, електричну та механічну міцність. В машинах потужністю більше 100 Вт і напругою вище 660 В, для підвищення електричної та механічної міцності ізоляції, обмотки виконують із жорстких секцій (катушок), які вкладають в прямокутні пази (рис. 5.4, в).

Секції виготовляють на спеціальних шаблонах із прямокутного обмоткового дроту, їм надають закінченої форми з усіма характерними вигинами, потім ізолюють, просочують у компаундах (лаках) і в готовому вигляді укладають в пази.

Трифазна обмотка статора складається з трьох ідентичних частин – обмоток фаз. Кожна з них в просторі осердя статора займає 1/3 площі, а отже третину пазів $Z/3$.

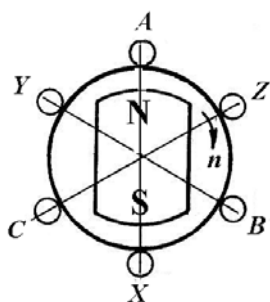


Рис. 5.5 – До пояснення принципу утворення трифазної обмотки

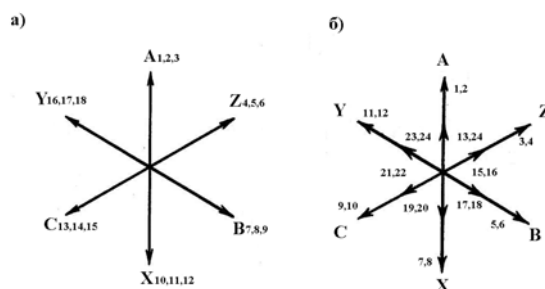


Рис. 5.6 – Зірки пазових е.р.с. трифазних обмоток $2p=2$; $q=3$; (а) та $2p=4$; $q=2$ (б)

На поперечному розрізі статора трифазної двополюсної машини зі скупченою обмоткою (рис. 5.5) показані обмотки трьох фаз, початки яких (А, В, С) мають зсув у просторі осердя на 120° .

При положенні ротора, зображеному на рис. 5.5, максимальна е.р.с. індукується в фазі А. Максимальна е.р.с. такого ж напрямку створиться в фазі В через проміжок часу, що відповідає повороту ротора на кут 120° . При повороті

ротора ще на 120° максимальна е.р.с. буде створюватись в фазі С. Отже, при такому розміщенні обмоток в просторі статора, можна отримати необхідний зсув між е.р.с. фаз у часі.

Із сказаного випливає, що при трифазній обмотці дво полюсної машини з рівномірним розподілом пазів по колу статора, останнє розбивають на шість рівних зон (із q пазів) в такій послідовності (за напрямом обертання ротора): початок першої фази (А), кінець третьої (Z), початок другої (В), кінець першої (Х), початок третьої (С), кінець другої (У). На рис. 5.6, а зображено просторову зірку пазових е.р.с. трифазної обмотки при $2p = 2$ і $q = 3$ з розбивкою пазів за зонами.

Якщо число пар полюсів машини більше одиниці, то зірку пазових е.р.с. при розподілі пазів "обходять" p раз (рис. 5.6, б) і отримують шість p зон. При $p > 1$ виникає необхідність ввести поняття *електричного кута*. Між висями сусідніх полюсів (N та S) електричний кут складає 180° . Якщо машина дво полюсна, то геометричний кут також 180° . Якщо ж у машині $p = 2$, то геометричний кут між висями полюсів зменшується вдвічі і дорівнює лише 90° ($360:4$), в шести полюсній машині цей кут складає лише 60° і т.д. Отже геометричний кут в машині менший від електричного в p раз.

Ротор двигуна з короткозамкненою обмоткою складається з вала, на який насаджено пакет заліза з пазами, в яких розміщено короткозамкнену обмотку. Така обмотка, її ще називають "біляче колесо", являє собою ряд металевих (алюмінієвих чи мідних) стрижнів, розташованих в пазах осердя ротора, і замкнених з обох боків короткозамкненими кільцями (рис. 5.7). Осердя ротора набирається з пластин, які виштамповують одночасно з пластинами осердя статора, але не покриваються ізоляційним лаком, як пластини статора, а мають лише оксидну плівку, що є достатньою ізоляцією, яка обмежує вихрові струми. Значення цих струмів у робочому режимі незначне, бо частота переманічування осердя ротора мала.

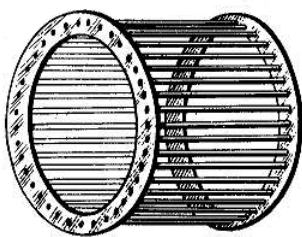


Рис. 5.7 – "Біляче колесо" – обмотка ротора

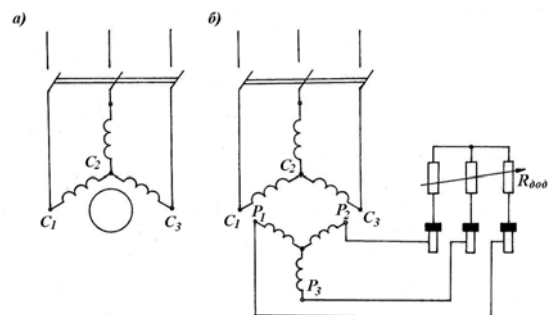


Рис. 5.8 – Принципові схеми ввімкнення трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим (а) і фазним (б) ротором

Короткозамкнена обмотка ротора у більшості двигунів виконується шляхом заливки зібраного осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом. При цьому, у деяких двигунів одночасно на короткозамкнених кільцях

відливаються і вентиляційні лопатки. Принципова схема підмикання такого двигуна до мережі зображена на (рис. 5.8, а). Як і ротор двигуна з короткозамкненою обмоткою, фазний ротор має вал з осердям, в пази якого вкладається обмотка. Обмотка такого ротора виконується, за аналогією з обмоткою статора, трифазною з'єднаною в зірку, а її кінці виведені на три контактних кільця. Тому такий двигун ще називають асинхронним двигуном з *контактними кільцями*. Контактні кільця ізолюють одне від одного і від вала, на якому вони жорстко закріплюються. Для здійснення електричного контакту з обмоткою ротора, що обертається, на кожне контактне кільце накладають, як правило, дві щітки, розташовані у щіткотримачах. Кожен щіткотримач має пружину, яка забезпечує необхідний тиск щітки на контактне кільце. Самі щіткотримачі закріплюють на передньому підшипниковому щиті двигуна і закривають спеціальним кожухом.

Асинхронні двигуни з фазним ротором, у конструктивному відношенні, більш складні, ніж двигуни з короткозамкненим ротором, а тому, і менш надійні в роботі. Але вони мають кращі регульовальні та пускові характеристики завдяки можливості вмикання в коло ротора додаткових опорів $R_{\text{дод}}$.

5.2. Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів з фазними та короткозамкненими роторами

Частота обертання визначається за формулою:

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s). \quad (5.3)$$

Звідси видно, що частота обертання може регулюватись зміною частоти мережі, зміною ковзання та зміною кількості пар полюсів. Промисловістю виготовляються асинхронні двигуни з перемиканням кількості полюсів. Регулювання ковзання здійснюється на двигунах з фазними роторами введенням в їх ланцюг активного опору. При цьому пусковий момент може дорівнювати максимальному при зменшеному пусковому струмі. Також ковзання можна регулювати зміною напруги мережі.

Пуску та регулюванню частоти обертання асинхронних двигунів в сучасних електроприводах приділяється значна увага. Пов'язано це, перш за все, з тим, що маючи просту конструкцію, досить високу надійність в експлуатації, ці двигуни складають основну частину парку електродвигунів, що використовуються у всіх сферах виробництва. Простота і економічність пуску та регулювання частоти обертання таких двигунів дозволили б, якби мали місце, суттєво знизити експлуатаційні витрати і підвищити ефективність виробництва.

Пуск асинхронного двигуна супроводжується перехідним процесом, зумовленим переходом ротора та механічно зв'язаних з ним частин виконавчого механізму із нерухомого стану до стану рівномірного обертання, коли обертовий момент двигуна урівноважується сумою гальмівних моментів, що діють на ротор двигуна.

Пускові характеристики двигуна визначаються, в першу чергу, значенням пускового струму або його кратністю $i_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$ та значенням пускового моменту чи пусковою здатністю. Двигун, що має хороші пускові характеристики, розвиває значний пусковий момент при порівняно незначному пусковому струмі. На жаль, отримати таке сполучення пускових параметрів у асинхронному двигуні, практично, неможливо. Пов'язано це з тим, що

$$M_{\text{пуск}} = k_m \cdot \Phi \cdot I_{2\text{пуск}} \cdot \cos\psi_2, \quad (5.4)$$

де $I_{2\text{пуск}}$ – струм, що виникає під час пуску в обмотці ротора.

Оскільки в момент пуску ротор нерухомий і $f_2 = f_1$, то струм ротора буде мати найбільше значення і перевищуватиме номінальне в 5-7 раз. Разом з тим, індуктивний опір обмотки ротора при пуску досить значний в порівнянні з активним, а отже, $\cos\psi_2$ малий. Тому кратність пускового моменту, як уже відзначалось, лише 1.1 – 2 рази. Якщо перевищення пускового моменту над номінальним виявляється достатнім для задовільного пуску, то 5 – 7 кратне перевищення пускового струму може призвести до небажаних наслідків.

У початковий момент пуску ковзання $s = 1$. Тоді, нехтуючи струмом холостого ходу, можна визначити пусковий струм обмотки статора:

$$I_{2\text{пуск}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (5.5)$$

З (5.5) витікає, що для зниження пускового струму слід або знижувати напругу, що підводиться до обмотки статора, або підвищувати активний опір обмотки ротора R_2' . Стосовно зниження напруги U_1 , то пусковий струм буде знижуватись пропорційно зниженню напруги, а пусковий момент – пропорційно квадрату напруги, що дозволить провести пуск двигуна лише при відсутності навантаження на валу. Доцільність застосування того чи іншого способу покращення пускових властивостей визначається конкретними умовами експлуатації двигуна і вимогами, що ставлять до його пускових властивостей.

Окрім пускових значень струму $I_{\text{пуск}}$ та моменту $M_{\text{пуск}}$ пускові характеристики оцінюють ще й такими показниками: тривалістю та плавністю пуску, складністю пускових операцій, їх економічністю (вартістю і надійністю пускової апаратури і втратами енергії в ній).

РОЗДІЛ 6. СИНХРОННІ МАШИНИ

6.1. Принцип дії та конструкція синхронних машин

Принцип дії однофазного генератора можна пояснити за допомогою макета генератора постійного струму (рис. 6.1), якщо в ньому півкільця замінити контактними кільцями (рис. 6.1, а).



Рис. 6.1 – Макети однофазного зворотної конструкції (а) та трифазного прямої конструкції (б) синхронних генераторів

При обертанні електропровідної рамки А в магнітному полі з кутовою частотою обертання ω , в її провідниках, згідно з законом електромагнітної індукції, створюється змінна е.р.с. e_A , миттєве значення якої визначиться за формулою (6.1). Наявність контактних кілець (замість півкілець, як у генератора постійного струму) дозволяє мати однофазний змінний струм навантаження.

Щоб отримати трифазний струм в макеті (рис. 6.1, а) необхідно додати ще дві рамки В і С, зсунувши їх в просторі на електричний кут в 120° . При цьому в кожній рамці будуть створюватись е.р.с., миттєві значення яких зсунуті в часі на кут 120°

$$\begin{aligned} e_A &= E \cdot \sin \omega \cdot t; \\ e_B &= E \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \\ e_C &= E \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (6.1)$$

Враховуючи, що рамки обертаються, для увімкнення трифазного навантаження, в макеті (рис. 6.1, а) слід передбачити чотири контактні кільця (три фази та нейтраль). Така конструкція синхронного генератора називається *зворотною* і може іноді застосовуватись для генераторів невеликої потужності.

В сучасних синхронних генераторах використовується *пряма* конструкція, коли трифазна обмотка якоря (рамки А, В, С на макеті) розташовується на статорі (рис. 6.1, б). В електромагнітному відношенні обидві конструкції

рівнозначні, але з практичних міркувань, перевага надається прямій конструкції, бо у цьому випадку до ковзного контакту на роторі підводиться потужність збудження, що складає лише 0,3 - 3% від номінальної потужності. При зворотній конструкції ковзний контакт довелося би розраховувати на повну потужність машини, але для потужних машин, що мають значні струми і напруги, забезпечити задовільну роботу таких контактів неможливо.

Частота f_1 індукованих в обмотках (рамках) статора е.р.с., пропорційна числу пар полюсів p та частоті обертання ротора n , тобто $f_1 = n \cdot p / 60$. Таким чином, для отримання е.р.с. визначеної частоти, число пар полюсів машини і її частота обертання повинні мати чітко визначену залежність між собою. Так, для отримання стандартної частоти $f_1 = 50$ Гц при $p = 1$ необхідно обертати ротор з частотою обертання $n = 3000$ об/хв ($\omega = 314$ рад/с), а при $p = 24$ - $n = 125$ об/хв ($\omega = 13$ рад/с).

Якщо до трифазної обмотки підімкнути навантаження, то струми, що при цьому виникнуть, створять обертове магнітне поле якоря. Це поле буде обертатися відносно статора з частотою обертання $n_1 = 60 f_1 / p$. Якщо в цю формулу підставити значення частоти f_1 , то отримують рівність частот обертання магнітного поля і ротора $n_1 = n$, що і є характерною особливістю синхронної машини, яка зумовила її назву.

При прямій конструкції синхронного генератора основне магнітне поле створюється постійним струмом обмотки ротора і обертається разом з ротором з його ж частотою обертання, тому результуюче магнітне поле, створене загальною дією обмоток статора і ротора, має ту ж частоту обертання.

У зворотному варіанті конструкції синхронного генератора якір розташований на роторі, а індуктор на статорі, тому основне магнітне поле нерухоме. Магнітне поле, що створюється струмами якоря, обертається відносно ротора з частотою обертання n_1 у напрямі, зворотному напрямку обертання ротора. Враховуючи, що $n_1 = n$, поле якоря буде нерухомим відносно статора. Таким чином, при обох варіантах конструкції магнітні поля статора і ротора, створюючи результуюче поле, будуть нерухомі відносно одне одного.

Синхронний генератор, як і будь-яка електрична машина, складається з нерухомої частини – статора, та ротора, що обертається привідним двигуном. Статор синхронної машини, в принципі, не відрізняється від статора асинхронної машини, тобто, складається з корпусу, осердя та обмотки.

Конструктивне виконання статора синхронної машини може бути різним, в залежності від призначення та габаритів машини. Так, у багатополюсних машинах великої потужності при зовнішньому діаметрі осердя статора більше ніж 900 мм, пластини осердя виконують із окремих сегментів, що при складанні (шихтовці) утворюють циліндр. Корпуси статора великогабаритних генераторів

виконують роз'ємними, з огляду на зручність транспортування і монтажу цих машин.

Ротори синхронних генераторів можуть мати дві конструкції, що принципово відрізняються: *явнополюсну* та *неявнополюсну*.

У залежності від первинного (привідного) двигуна (головним чином, застосовують три види привідних двигунів: парові турбіни, гідротурбіни та двигуни внутрішнього згорання – дизелі) генератори поділяють на *турбогенератори*, *гідрогенератори* та *дизель-генератори*.

Турбогенератор. Турбогенератори приводяться до обертання паровою турбіною і працюють на теплових та атомних електростанціях. Частота обертання таких генераторів досить висока: на теплових станціях 3000 об/хв, а на атомних – 1500 об/хв, тому вони використовуються, відповідно, з однією та двома парами полюсів на роторі неявнополюсної конструкції (рис. 6.2, а).

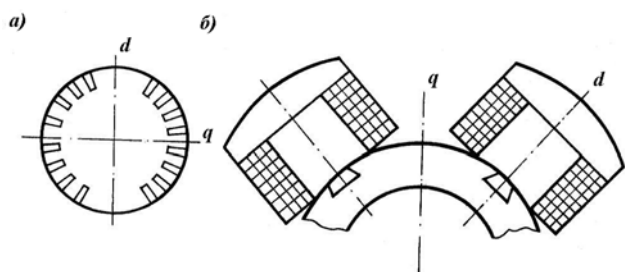


Рис. 6.2 – Конструкція ротора неявнополюсного (а) та явнополюсного (б) синхронного генератора

Ротор турбогенератора виконують масивним із цілої поковки високоякісної хромонікелевої чи хромомолібденової сталі, при цьому, за умовами механічної міцності, його діаметр не повинен перевищувати 1,2 ÷ 1,25 м при довжині до 11 м. На зовнішній поверхні ротора фрезерують пази прямокутної форми, у які укладають обмотку збудження. Її лобові частини закріплюють роторними бандажами. Близько

третини полюсної поділки обмоткою не займається, і ця частина ротора утворює так званий «великий зуб», через який замикається більша частина магнітного потоку генератора. Виводи від обмотки збудження приєднують до контактних кілець на роторі.

Вздовж вісі ротора по всій довжині висвердлюють центральний отвір, що служить для дослідження матеріалу центральної частини ротора і для розвантаження поковки від небезпечних внутрішніх напружень.

Гідрогенератор. Частота обертання гідротурбіни, що обертає гідрогенератор, в залежності від потужності турбіни та напору води, складає від 50 до 600 об/хв. Для того щоб при таких частотах обертання отримати змінну напругу частотою в 50 Гц, гідрогенератори повинні мати кілька десятків полюсів. Значна кількість полюсів вимагає і відповідного діаметра явнополюсного ротора, який у потужних гідрогенераторів складає близько 12 м при довжині осердя статора до 3 м.

Таке співвідношення діаметра та довжини вимагає вертикального розташування гідрогенераторів у просторі і має, пов'язані з цим, конструктивні особливості. Важливим вузлом у них є опорний підшипник ковзання чи підп'ятник, що утримує вагу частин ротора і турбіни, що обертаються, а також сприймає тиск води на лопатки турбіни.

Для сприйняття радіальних зусиль, що діють на ротор, на валу гідрогенератора установлюють один або два направляючих підшипники. Один з них біля жорсткого фланцевого з'єднання валів генератора і турбіни.

Механічна міцність різних деталей гідрогенераторів розраховується за так звано, *угонною частотою* обертання, яка в 2-3 рази більша від номінальної і може мати місце в результаті розгону ротора при аварійному відмиканні генератора від мережі.

Дизель-генератор. Дизель-генератор приводиться до обертання двигуном внутрішнього згорання. Як і гідрогенератори, дизель-генератори мають явнополісну конструкцію ротора і розраховуються на частоту обертання $600 \div 1500$ об/хв.

Дизель-генератори, в порівнянні з турбо- та гідрогенераторами, мають незначну потужність до 100 кВА і використовуються на пересувних електростанціях, для живлення привідних електродвигунів тепловозів, кораблів та ін.

Більшість синхронних машин мають електромагнітне збудження. Джерелами постійного струму для обмоток збудження є спеціальні системи, до яких ставлять ряд вимог:

- надійне і стійке регулювання струму збудження в будь-яких режимах роботи машини;
- достатню швидкодію, для чого застосовують *форсування збудження*, тобто швидке збільшення напруги збудження до найбільшого значення, що складає (1,8 - 2) номінальної напруги збудження; форсування застосовується для підтримки стійкої роботи при аварії та в процесі її ліквідації;
- швидке гасіння магнітного поля, тобто зниження струму збудження до нуля без значного підвищення напруги на обмотці збудження.

Для збудження синхронних машин застосовується кілька систем. Найпростішою з них є електромашинна система збудження з генератором постійного струму, який називають *збуджувачем* (рис. 6.3, а).

Збуджувач, як правило, розташовується на валу синхронного генератора і має обмотку паралельного або незалежного збудження, джерелом живлення якої є також генератор постійного струму (*підзбуджувач*). На (рис. 6.3, а) зображено схему збудження, де збуджувач має паралельне збудження, яке дозволяє форсування збудження синхронного генератора контактором K_{ϕ} , що

шунтує опір в колі збудження збуджувача. Гасіння магнітного поля (рис. 6.3) здійснюється у такій послідовності: вмикається контактор K_2 (обмотку збудження шунтують опором R_{Γ} , значення якого приблизно в п'ять раз більше, ніж опір обмотки збудження). Потім розмикається контактор K_1 і енергія, що накопичується в обмотці збудження, гаситься на резисторі R_2 . Це дозволяє запобігти виникненню перенапруги.

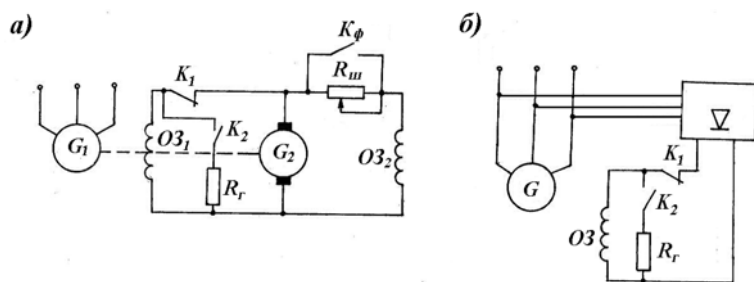


Рис. 6.3 – Електромашинна система збудження (а) та система з самозбудженням (б) синхронних генераторів

перенапруги.

Останнім часом замість електромашинного збудження застосовують вентильні системи з діодами або тиристорами. Ці системи можуть бути побудовані на великі потужності і є більш надійними, ніж електромашинні. У вентильній системі з самозбудженням (рис. 6.3, б) для збудження використовується енергія, що виробляється обмоткою статора генератора. Принцип самозбудження тут не відрізняється від принципу самозбудження генераторів постійного струму.

Вентильна система може мати і незалежне збудження від збуджувача – синхронного генератора, ротор якого укріплено на валу основного генератора і виконує роль індуктора. Тоді струм збудження основного генератора від збуджувача через випрямляч подається з обмотки статора на контактні кільця. Різновидністю вентильного збудження є безщіткова система збудження. У цьому випадку на валу основної синхронної машини розміщують якір збуджувача змінного струму з трифазною обмоткою. Змінна напруга цієї обмотки за допомогою випрямляча, закріпленого на валу машини, перетворюється в постійну напругу і безпосередню, без контактних кілець, подається на обмотку збудження головного генератора. Обмотку збудження збуджувача розташовано на статорі. Вона отримує постійний струм від незалежного джерела.

РОЗДІЛ 7. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

7.1. Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин

Використання електричних машин в якості двигунів та генераторів є їхнім основним призначенням, пов'язаним з взаємним перетворенням електричної та механічної енергій.

Розглянемо на макеті, що складається з двох полюсів і провідника, процес взаємного перетворення механічної і електричної енергій (рис. 7.1).

Якщо до провідника *ав* довжиною *l* прикласти механічну силу $F_{\text{мех}}$, то він буде переміщатися з лінійною швидкістю *v* у напрямку дії сили. Згідно закону електромагнітної індукції в провіднику *ав* буде виникати електрорушійна сила (е.р.с.):

$$E = B \cdot l \cdot v, \quad (7.1)$$

де *B* – магнітна індукція, Тл .

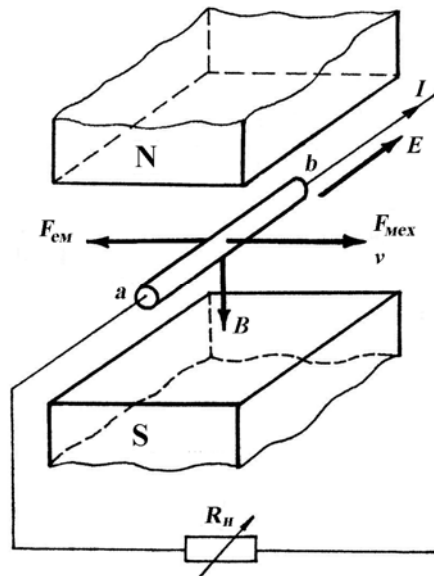


Рис. 7.1 – Макет елементарного генератора

Слід пам'ятати, що напрям е.р.с. в провіднику визначається *правилом правої руки* . Долоню правої руки розташовують у магнітному полі так, щоб лінії індукції входили в неї, відігнутий на 90° великий палець показував напрям руху провідника відносно поля, тоді чотири пальці будуть вказувати напрям е.р.с. (на рис. 7.1 від *a* до *в*).

Якщо замкнути провідник на навантаження R_H , то в колі, під дією е.р.с., у напрямі, що співпадає з її напрямом, виникне *струм I*. Таким чином, провідник, що рухається у магнітному полі, можна розглядати як *елементарний генератор*.

В свою чергу, на провідник зі струмом у магнітному полі, згідно з явищем електромагнітної індукції, діє *електромагнітна сила* (сила Ампера):

$$F_{\text{ем}} = B \cdot l \cdot I. \quad (7.2)$$

Напрямок цієї сили визначається *правилом лівої руки*. Долоню лівої руки розміщують назустріч лініям поля, чотири витягнутих пальці – за напрямом

струму, тоді великий палець, відігнутий на 90° , покаже напрям сили. На рис. 7.1. вона направлена справа наліво, тобто, назустріч руху провідника, отже є гальмівною.

Уявимо, що рух провідника рівномірний ($v = \text{const}$), тоді сили механічна і електромагнітна урівноважують одна одну $F_{\text{мех}} = F_{\text{ем}}$. Оскільки $v \neq 0$, то, помноживши обидві частини рівняння на швидкість, отримаємо

$$F_{\text{мех}} \cdot v = F_{\text{ем}} \cdot v. \quad (7.3)$$

Скориставшись (7.2), підставимо в праву частину значення $F_{\text{ем}}$:

$$F_{\text{мех}} \cdot v = B \cdot l \cdot I \cdot v = E \cdot I. \quad (7.4)$$

В лівій частині цього рівняння маємо значення підведеної до провідника механічної потужності, а в правій – значення електричної потужності, що розвивається в замкнутому колі струмом I під дією е.р.с. E . Отже, можна стверджувати, що даний макет демонструє, як механічна потужність в генераторі перетворюється в електричну.

Якщо в цьому макеті, як зазначено на рис. 7.2, замість опору навантаження увімкнути джерело живлення з напругою U , то в провіднику, під дією останньої, виникне електричний струм I від плюса джерела до мінуса.

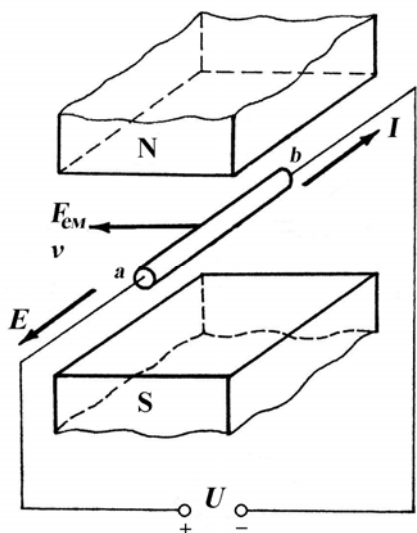


Рис. 7.2 – Елементарний двигун

Як і в попередньому випадку на провідник буде діяти сила $F_{\text{ем}}$, напрям якої визначиться правилом лівої руки, а отже справа наліво. Під дією цієї сили провідник буде переміщатися в тому ж напрямі, в якому діє сила $F_{\text{ем}}$, що приведе до появи е.р.с. E . Скориставшись правилом правої руки, побачимо, що напрям е.р.с. протилежний напрямам струму та напруги. Отже, згідно з другим законом Кірхгофа частина прикладеної напруги урівноважується е.р.с. E , а частина

падінням напруги на якорі електричного кола R

$$U = E + I \cdot R. \quad (7.5)$$

Помноживши обидві частини рівняння на струм I (зазвичай не дорівнює нулю), отримаємо:

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot R. \quad (7.6)$$

Якщо в цьому рівнянні E замінити згідно з (7.1), то будемо мати:

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot R, \quad (7.7)$$

або згідно з (7.2):

$$U \cdot I = F_{\text{ем}} \cdot v + I^2 \cdot R. \quad (7.8)$$

У лівій частині отриманого рівняння значення електричної потужності, що надходить в провідник із джерела живлення, а в правій те, в що вона

перетворюється. Частково це, згідно з (7.3), механічна потужність ($F_{em} \cdot v$), а частково *електричні втрати* ($I^2 R$), що виникають в провіднику при протіканні струму. Отже, можна вважати, що у цьому випадку макет демонструє роботу *елементарного електродвигуна*.

Аналізуючи роботу макета в обох випадках, можна зробити висновки:

- щоб отримати електричну машину, необхідно мати магнітне поле, електропровідне середовище (провідник) та можливість їхнього взаємного переміщення;

- при роботі електричної машини як в режимі генератора, так і в режимі двигуна у її провідниках, що перетинають магнітне поле, створюється е.р.с. і виникають електромагнітні сили, що діють на провідник зі струмом в магнітному полі;

- взаємне перетворення механічної енергії в електричну і навпаки відбувається в електричній машині у будь-якому напрямі. Тобто, та сама машина може працювати і як двигун, і як генератор. Ця властивість називається *оборотністю електричної машини*.

Розглянуті «елементарні» генератор та двигун відображають лише принцип використання в них основних законів та явищ електричного струму. Що стосується конструктивного виконання, то більшість електричних машин побудовано на обертовому русі однієї із двох складових частин, що називається *ротором*. Нерухома частина називається *статором*. Ротор розміщено в розточці статора і відокремлено від нього *повітряним зазором*. В залежності від функціонального призначення, ці дві складові частини поділяють на *індуктор* (та частина машини, яка створює магнітне поле) та *якір* (частина, в якій індуктується е.р.с.). Розміщення індуктора і якоря на статорі чи роторі залежить від виду та призначення машини, але будь-яке їх розміщення не впливає на принцип роботи.

7.2. Влаштування та принцип дії генератора і двигуна постійного струму

Принцип дії генератора оснований на явищі електромагнітної індукції і полягає у тому, що, при обертанні в магнітному полі електропровідної рамки (обмотки), в її провідниках виникає *змінна е.р.с.*, миттєве значення якої, при рівномірному обертанні з *кутовою частотою обертання ω* , визначиться як:

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (7.9)$$

де t - час, с.

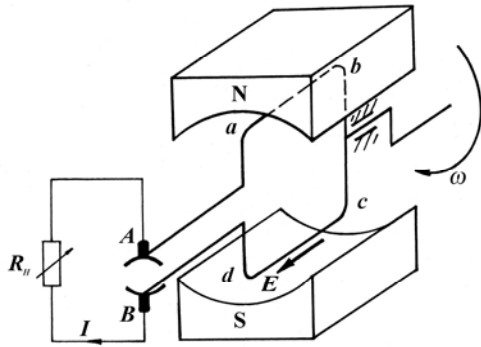


Рис.7.3 – Спрощена модель генератора постійного струму

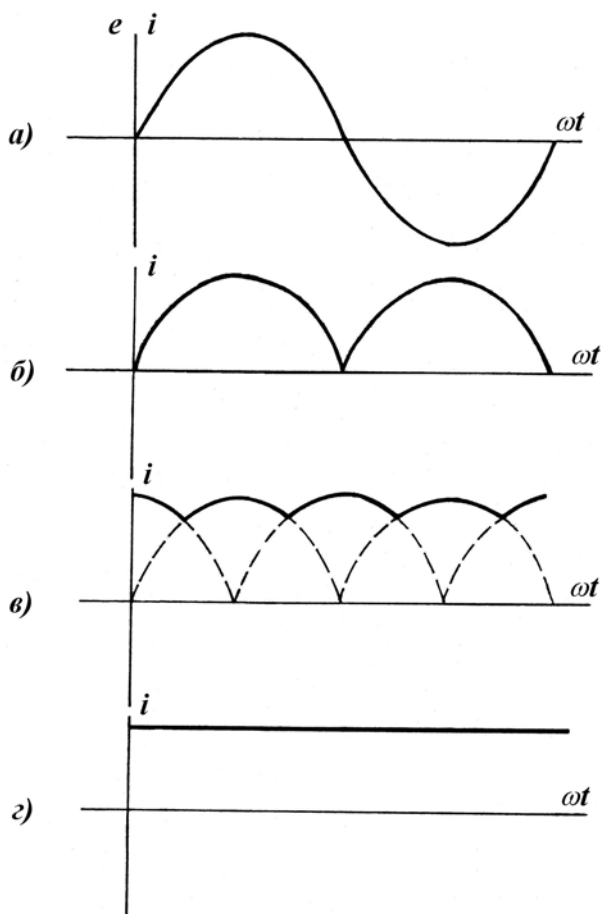


Рис. 7.4 – Графік зміни е.р.с. та струму в рамці (а) та на опорі навантаження (б), (в) (г)

максимуму (рис. 7.4, б). Якщо в макеті замість однієї, взяти дві взаємно перпендикулярні рамки з чотирма пластинами, то це дозволить знизити пульсації струму (рис. 7.4, в). При восьми рамках і 16 пластинах пульсації практично зникнуть взагалі (рис. 7.4, г), тобто, стум буде постійним. Отже, в генераторі постійного струму колектор разом із щітками відіграють роль

Щоб отримати генератор постійного струму, необхідно випрямити цю е.р.с. Роль випрямляча грає колектор. Розглянемо, як відбувається випрямлення змінної е.р.с. на макеті (рис. 7.3), що складається з постійного магніту, між полюсами N і S якого розміщена електропровідна рамка $abcd$. Кінці рамки з'єднано з двома ізольованими півкільцями, до яких дотикаються дві нерухомі щітки A і B . Рамка $abcd$ завдяки підшипнику має можливість обертатися разом з півкільцями. Е.р.с., що створюється при обертанні рамки, викликає струм в колі рамка – щітка B – R_n – щітка A . Напрямок і величина е.р.с. та струму в рамці $abcd$, визначаються положенням провідників рамки під полюсами і напрямом обертання. Однак, при обертанні, незалежно від положення провідників під полюсами, з щіткою A буде з'єднаний через "власне" півкільце провідник, що розташовується під полюсом N , а з щіткою B – провідник, що розташований під полюсом S . Струм зовнішнього кола в даному макеті направлений від щітки B (позитивна щітка) до щітки A (негативна щітка). Зміна струму на опорі навантаження відбувається лише за значенням, але не за напрямом, тобто, він буде пульсувати від нуля до

механічного випрямляча змінного струму, що виникає в обмотці якоря, в постійний у зовнішньому колі машини.

У відповідності з принципом *оборотності*, макет (рис. 7.3) генератора може служити макетом двигуна. Якщо замість опору навантаження увімкнути джерело живлення, то рамкою буде протікати струм і на провідники рамки діяти електромагнітні сили. Вони створять *електромагнітний момент*. Під

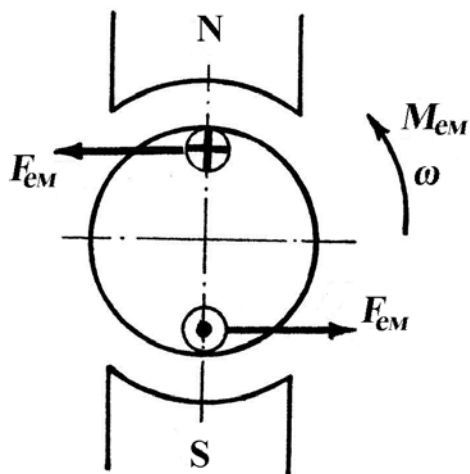


Рис. 7.5 – До принципу дії двигуна постійного струму

його дією рамка зможе обертатися (рис. 7.5). Завдяки півкільцям та щіткам (наприклад, щітка *A* позитивна, а *B* негативна) постійний струм джерела живлення перетворюється у змінний в рамці. Це дозволяє, при переміщенні провідника з-під одного полюса під інший, змінити напрям струму в провіднику на протилежний, бо півкільце в цей же час переміщується з під щітки *A* під щітку *B*. Зміна напрямку струму в провідниках залишає незмінним напрям електромагнітного моменту. Таким чином, при роботі машини в режимі двигуна, колектор

разом із щітками відіграє роль механічного *інвертора*, тобто, перетворює постійний струм джерела у змінний в обмотці якоря.

Як і будь-яка електрична машина, машина постійного струму складається з двох частин: статора і ротора. На статорі розташований індуктор, а на роторі – якір. Статор-індуктор призначений в машині постійного струму для створення магнітного поля, частіше всього електромагнітним шляхом, тобто, *обмоткою збудження*. Ця обмотка виконується у вигляді котушки (з каркасом, чи без нього) з мідного дроту і насаджується на *основний (головний) полюс*. Число основних полюсів в машині – $2p$ (де p – число пар полюсів). Основні полюси виконуються шляхом штамповки із листів конструкційної сталі товщиною 1-1,5 мм і мають вигляд, поданий на (рис. 7.6, а).

Із пластин набирається пакет полюса, який, в свою чергу, кріпиться до *ярма*. Ярмо служить для замикання магнітного потоку між полюсами. Воно виконується шляхом лиття або відрізається з товстостінної труби. Матеріал ярма – чавун або сталь. Між основними полюсами до ярма кріпляться *додаткові полюси*, що виконуються так, як і основні полюси. Їх пластини мають вигляд, зображений на (рис. 7.6, б).

В машинах малої потужності число додаткових полюсів може бути в два рази меншим, ніж основних. Зовні до ярма кріплять клемну коробку та лапи для монтажу машини. В клемну коробку виводять кінці обмоток: Я1, Я2 – обмотка

якоря; Ш1, Ш2 – обмотка збудження паралельна; С1, С2 – обмотка збудження послідовна; Д1, Д2 – обмотка додаткових полюсів; К1, К2 – компенсаційна обмотка.

Ярмо, разом з полюсами, лапами та клемною коробкою, називають ще *станиною*. З боків до станини кріплять *підшипникові щити*. Вони призначені для центрівки ротора відносно статора і створення рівномірного повітряного зазору між полюсами та ротором. На одному з підшипникових щитів, він називається *передній*, розміщений *щітковий апарат*. Щітковий апарат складається з *траверзи, щіткових пальців, щіткотримачів та щіток*. Траверза, кільцева або променева, дозволяє зміщувати щітки на деякий кут відносно основного їхнього положення. Щіткові пальці призначені для ізолювання щіток між собою та від станини. Вони виконуються із гетинаксу чи текстоліту прямокутного або круглого перерізу. Щіткотримачі складаються з *щіткового гнізда, пружини та притискувача*. Щіткотримач забезпечує положення щітки на вісі машини і створює необхідний тиск на колектор. Щітки виконують з мідно-графітової суміші, впресовуючи в неї мідний тросик для з'єднання кола якоря. Ротор складається з *валу*, на який насаджено *пакет заліза з пазами* для укладки обмотки якоря. Пакет заліза набирається (*шихтується*) з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35-0,5 мм, що ізолюються один від іншого спеціальним лаком для зниження втрат на *вихрові струми*. Обмотка якоря з мідного дроту вкладається в пази і з'єднується з колектором. Колектор виконується з *колекторних пластин* трапецієвидного перерізу, що мають форму, зображену на (рис. 7.7).

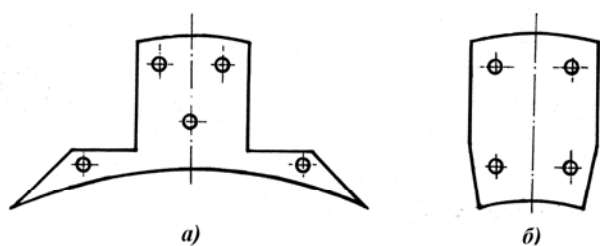


Рис. 7.6 – Пластини головного (а) та додаткового (б) полюсів

Вони виконуються із гетинаксу чи текстоліту прямокутного або круглого перерізу. Щіткотримачі складаються з *щіткового гнізда, пружини та притискувача*. Щіткотримач забезпечує положення щітки на вісі машини і створює необхідний тиск на колектор. Щітки виконують з мідно-графітової суміші, впресовуючи в неї мідний тросик для з'єднання кола якоря. Ротор складається з *валу*, на який насаджено *пакет заліза з пазами* для укладки обмотки якоря. Пакет заліза набирається (*шихтується*) з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35-0,5 мм, що ізолюються один від іншого спеціальним лаком для зниження втрат на *вихрові струми*. Обмотка якоря з мідного дроту вкладається в пази і з'єднується з колектором. Колектор виконується з *колекторних пластин* трапецієвидного перерізу, що мають форму, зображену на (рис. 7.7).

суміші, впресовуючи в неї мідний тросик для з'єднання кола якоря. Ротор складається з *валу*, на який насаджено *пакет заліза з пазами* для укладки обмотки якоря. Пакет заліза набирається (*шихтується*) з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35-0,5 мм, що ізолюються один від іншого спеціальним лаком для зниження втрат на *вихрові струми*. Обмотка якоря з мідного дроту вкладається в пази і з'єднується з колектором. Колектор виконується з *колекторних пластин* трапецієвидного перерізу, що мають форму, зображену на (рис. 7.7).

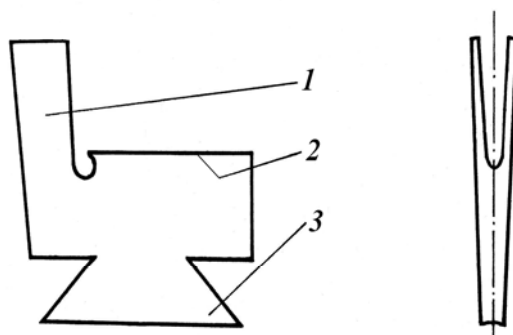


Рис. 7.7 – Зовнішній вигляд колекторної пластина:
1-колекторна пластина, 2-робоча поверхня, 3-ластівчин хвіст

Щітка притискується до робочої поверхні колекторної пластини. Ластівчин хвіст необхідний для з'єднання пластини з обмоткою. Колекторні пластини ізолюють між собою і валом ротора *міканітовими прокладками* і стягують спеціальними *конусними гайками* та *шайбами*, створюючи колектор, насаджений на вал. На валу машини, зі сторони протилежної колектору, як правило, для покращання охолодження насаджується вентилятор. Із розглянутого принципу дії та конструкції машин постійного струму витікає, що обов'язковим елементом цієї машини є колектор, який вмикається між обмоткою якоря та зовнішнім колом. Наявність колектора значно ускладнює конструкцію, погіршує експлуатаційні характеристики, підвищує вартість.

7.3. Характеристики генераторів постійного струму незалежного, паралельного, послідовного та змішаного збудження

Спосіб збудження генераторів визначає їхні характеристики, які простіше всього виражаються графічним шляхом, тобто, у вигляді кривих, так званих, *характеристик генераторів*.

Генератор незалежного збудження. Схема вмикання генератора незалежного збудження показана на рис.7.8. Реостат R_{pz} , увімкнений в коло збудження, дозволяє змінювати струм збудження I_z , а отже, і основний магнітний потік машини.

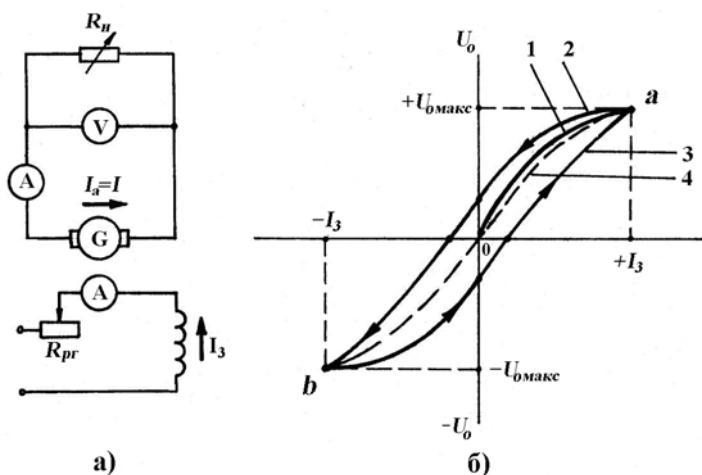


Рис. 7.8 – Принципова схема (а) і характеристика НХ (б) генератора незалежного збудження

Джерелом збудження може бути акумулятор, випрямляч чи інший генератор постійного струму, що у цьому випадку називають *збуджувачем*.

Характеристика неробочого ходу. Цю характеристику знімають в режимі НХ ($I_a = 0$). Генератор приводять до обертання з номінальною частотою, яку підтримують незмінною на протязі всього досліду. Поступово збільшують струм збудження I_z від нуля до значення, за якого напруга

$U = 1,15 U_{ном}$. Отримують дані для побудови кривої 1 на рис.7.9, б. Початкова ордината кривої 1 не дорівнює 0, що пояснюється дією незначного магнітного потоку *залишкового магнетизму*, що зберігся від попереднього намагнічування. Зменшивши струм збудження до нуля, а потім, змінивши його напрям на протилежний, отримують криву 2, що називається *низхідною віткою* характеристики.

Низхідна вітка проходить вище, ніж крива 1, що пояснюється зростанням залишкового намагнічування. Надалі дослід проводять в зворотному напрямі, зменшуючи струм збудження від $-I_z$ до 0. Потім, збільшуючи до $+I_z$, отримують *висхідну вітку* характеристики 3. Низхідна та висхідна вітки утворюють *петлю*

гістерезису. Розрахункова характеристика НХ 4 являє собою середню лінію між кривими 2 та 3.

Прямолінійна частина характеристики НХ відповідає ненасиченій магнітній системі машини. Точка номінальної напруги генератора лежить на середньо насиченій частині характеристики. Збільшення стуму збудження більше значення $I_{30 \text{ ном}}$, який створює при НХ номінальну напругу $U_{\text{ном}}$, перенасичує магнітну систему і викривляє характеристику.

Якщо струм навантаження не дорівнює нулю, наприклад, $I = I_{\text{ном}}$, мають навантажувальну характеристику, крива якої буде проходити нижче, ніж характеристика НХ. При цьому відстань між кривими характеристик НХ і

навантажувальною буде збільшуватись при збільшенні стуму збудження (рис. 7.9, а).

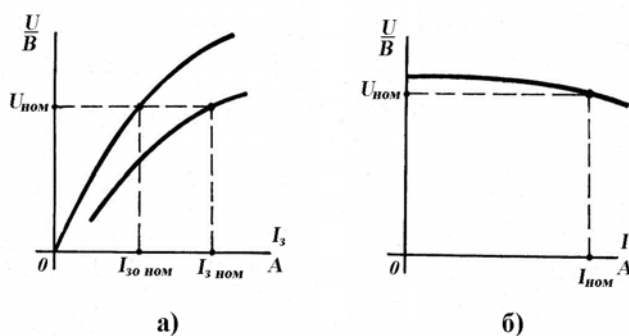


Рис. 7.9 – Навантажувальна (а) та зовнішня (б) характеристики генератора незалежного збудження

Зовнішня характеристика генератора. Ця характеристика являє залежність $U=f(I)$ при $n = \text{const}$ та $R_z = \text{const}$. Дані для її побудови знімають наступним чином. Генератор навантажують до номінального струму при номінальній напрузі, потім зменшують навантаження і записують показання приладів. За

отриманими даними будують криву рис. 7.9, б. Зменшення напруги при зростанні навантаження пояснюється падінням напруги в колі якоря та розмагнічувальною дією реакції якоря. Нахил характеристики до вісі абсцис (*жорсткість* зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною $\Delta U_{\text{ном}}$:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 [\%]. \quad (7.9)$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження $\Delta U_{\text{ном}} = 5 \div 10 \%$.

Регулювальна характеристика. Характеристика $I_z = f(I)$ показує, як треба змінювати струм збудження, щоб при зміні навантаження напруга залишалась незмінною.

Збудивши генератор струмом $I_{зоном}$ при НХ до значення напруги $U_{ном}$ навантажують генератор і одночасно збільшують струм збудження, підтримують напругу незмінною (рис.7.10).

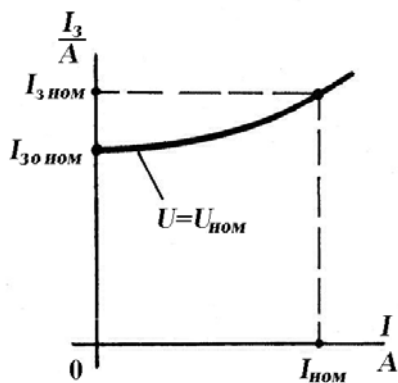


Рис. 7.10 – Регулювальна характеристика генератора незалежного збудження

Генератори незалежного збудження мають задовільні характеристики. Недоліком цих генераторів є необхідність мати стороннє джерело живлення.

Генератор паралельного збудження. Указаного вище недоліку позбавлені генератори з самозбудженням, одним з яких є генератор паралельного збудження. Його схема зображена на рис. 7.11, а.

Принцип самозбудження такого генератора оснований на тому, що магнітна система машини, будучи намагніченою, зберігає довгий час незначний залишковий магнітний потік $\Phi_{зал} \approx 2 \div 3\%$ від $\Phi_{ном}$. При обертанні якоря, $\Phi_{зал}$ індукуює в його обмотці е.р.с. $E_{зал}$, під дією якої обмоткою збудження протікає незначний струм $I_{зал}$. Якщо магнітний потік, що створюється цим струмом, співпадає за напрямом з $\Phi_{зал}$, то е.р.с. якоря буде зростати. Відповідно, буде зростати і струм збудження. Цей процес буде протікати доти,

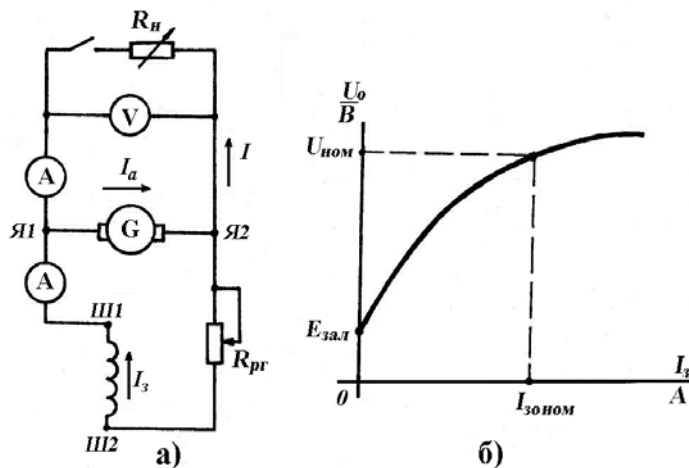


Рис. 7.11 – Принципова схема (а) та характеристика НХ (б) генератора паралельного збудження

доки магнітна система не насититься. Процес самозбудження не буде мати місця, якщо опір кола збудження буде більшим ніж критичний, при якому збудження неможливе, а частота обертання меншою, ніж критична. Характеристика НХ такого генератора представлена на рис. 7.11, б. При струмі збудження рівному нулю, напруга дорівнює $E_{зал}$ – е.р.с., що створюється залишковим потоком.

Зовнішня характеристика такого генератора м'якша від зовнішньої характеристики генератора незалежного збудження. Це зумовлено тим, що зниження напруги на затискачах генератора від падіння напруги в колі якоря та розмагнічувальної дії реакції якоря, приводить до зниження струму збудження, а отже, і е.р.с., що створюється в обмотці якоря (рис. 7.12).

Падіння напруги в генераторі паралельного збудження, доки машина насичена, відносно незначне до навантаження $I_{кр}$. Далі машина переходить в

ненасичений стан і напруга різко падає до нуля. Струм к.з. I_k буде незначним, зумовленим е.р.с. E_3 .

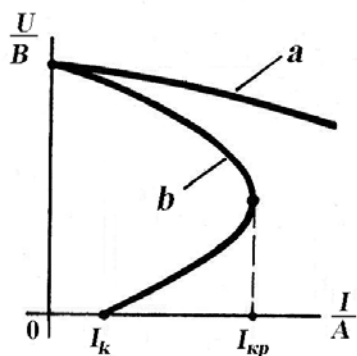


Рис. 7.12 – Зовнішні характеристики генератора незалежного (а) та паралельного (б) збудження

Генератори паралельного збудження широко використовують в установках постійного струму, бо відсутність збуджувача вигідно відрізняють їх від генераторів незалежного збудження. Номінальне падіння напруги такого генератора складає $10 \div 30 \%$.

Генератор змішаного збудження (рис. 7.13,а) має паралельну та послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється, в основному, паралельною обмоткою. Послідовна обмотка, як правило, вмикається так, щоб м.р.с. обмоток складались, що забезпечує жорстку зовнішню характеристику генератора.

В режимі НХ генератор має лише паралельне збудження, оскільки $I = 0$. При появі навантаження потік послідовної обмотки збудження компенсує падіння напруги в якорі та розмагнічувальну дію реакції якоря і зовнішня характеристика змінюється по кривій 2 (рис . 7.13, б).

При збільшенні числа витків послідовної обмотки можна отримати незмінну напругу на кінцях лінії, (компенсується падіння напруги в лінії) крива 1 на рис. 7.13, б.

Якщо обмотки генератора увімкнути *назустріч*, то зовнішня характеристика стане досить м'якою – крива 3. Це дає змогу використати такий генератор в електрозварювальних пристроях постійного струму.

Генератори змішаного збудження з погодженим увімкненням обмоток застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли необхідно мати незмінну напругу в лінії.

Обмотка збудження генератора послідовного збудження ввімкнена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням, тому напруга такого генератора різко змінюється зі зміною навантаження. На практиці такі генератори, як джерело постійного струму, не використовують, бо до генераторів завжди ставлять вимогу підтримки незмінності напруги, що не може забезпечити генератор послідовного збудження.

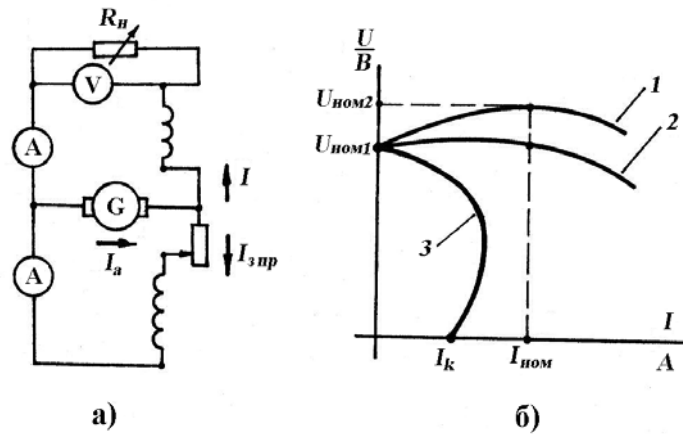


Рис. 7.13 – Принципова схема (а) та зовнішні характеристики (б) генератора змішаного збудження

7.4. Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Кутова частота обертання пропорційна напрузі і зворотно пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це можна пояснити тим, що підвищення напруги U або зниження потоку викличе збільшення різниці $(U - E_a)$, що в свою чергу, призводить до зростання струму якоря I_a . Струм, при зростанні, підвищує електромагнітний момент $M_{ем}$, а оскільки момент навантаження залишається незмінним, то зростає частота обертання. Останнє вказує на можливі шляхи регулювання кутової частоти обертання:

- зміною напруги U , яку підводять до двигуна; при цьому частота обертання може бути зміненою від нуля до $1,15 \omega_{ном}$ (підвищення напруги більш ніж на $10 \div 15 \%$ небажане через підвищення напруги між колекторними пластинами і, як наслідок, погіршення комутації);

- введення додаткових опорів у коло якоря, що дає можливість змінювати кутову частоту обертання від номінальної до нуля;

- зміною магнітного потоку. В насиченій машині потік можна лише знизити і тим самим збільшити частоту обертання (досягається зміною струму обмотки збудження) від номінальної частоти обертання до $(1,5 \div 1,7) \omega_{ном}$.

7.5. Характеристики і застосування машин постійного струму

Генератори постійного струму застосовують у якості джерела постійного струму в автономних установках (транспортні засоби), у системах генератор-двигун, як джерела технологічного струму (зварювальні генератори). Для з'ясування особливостей застосування двигунів постійного струму необхідно відзначити їхні характеристики в порівнянні з іншими двигунами – асинхронними.

Переваги двигунів постійного струму:

1. Можливість плавного й економічного регулювання частоти обертання в широких межах,
2. Легкість одержання спеціальних механічних характеристик.

Недоліки двигунів постійного струму:

1. Складність виготовлення, висока вартість.
2. Складність в експлуатації, необхідність постійного догляду.
3. Невисока надійність.

З розгляду властивостей впливає загальне правило застосування двигунів постійного струму: регульований привід, або привід, що вимагає спеціальних механічних характеристик. Основні області застосування наступні:

1. Привід важких і середніх верстатів.
2. Металургійний привід (насамперед, прокатний).
3. Паперове виробництво.
4. Електротранспорт – тягові двигуни.
5. Будівництво – електрифіковані землерийні машини.

Двигун постійного струму на даний час є основним двигуном виконавчих механізмів у системах автоматизованого електропривода, де потрібно висока динамічна і статична точність регулювання (наприклад, робототехніка)

РОЗДІЛ 8. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Електроприводом (ЕП) називається комплектний електромеханічний пристрій, що служить для перетворення електричної енергії у механічну. До складу електропривода входять електричні машини (у найпростішому випадку двигуни), передатні пристрої (редуктори і т.п.) і апаратура керування і захисти. В деякі види електроприводу входять перетворювальні пристрої: випрямлячі, перетворювачі частоти, інвертори.

8.1. Класифікація електроприводів

1. Електроприводи, що використовуються у виробничих процесах, розділяють на три групи: *груповий* (трансмісійний), *одиначний* (однодвигуновий) і *багатодвигуновий*.

Груповий електропривод – це електропривод, у якому від одного двигуна рух передається групі робочих машин або механізмів.

Одиначним електроприводом називається привод, в якому робочі органи машини або виробничого механізму рухаються від одного двигуна. В одиначному електроприводі електродвигун з'єднується з робочою машиною ланцюговою або ремінною передачею за допомогою редуктора або муфти (транспортери, насоси і т.п.).

Багатодвигуновий електропривод – це привод, в якому декілька органів машини отримують рух кожний від свого двигуна (наприклад, підйомний мостовий кран).

2. *За родом струму* електроприводи бувають постійного або змінного струму.

3. *За навантаженням* електроприводи поділяють на приводи із постійним і змінним навантаженням (прикладом приводу зі змінним навантаженням може служити привід поршневого насоса).

4. *За режимом роботи* – тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний.

Пояснимо останнє положення. Як відомо, при роботі двигунів виникають втрати енергії, що приводять до нагрівання активних частин – обмоток і сердечників. Втрати енергії, а, отже, і нагрів двигуна залежать від навантаження.

При вмиканні двигуна температура зростає за експоненціальним законом, а при вимиканні – також за експоненціальним законом зменшується до температури навколишнього середовища.

Тривалий режим (рис. 8.1) це такий режим, при якому температура обмоток за час роботи досягає сталого значення.

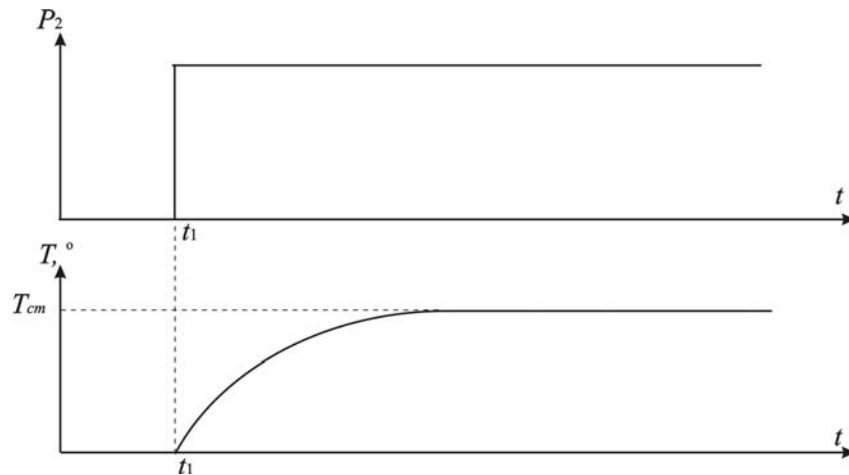


Рис.8.1 – Діаграми зміни потужності і температури у сталому режимі

Короткочасний режим (рис. 8.2.) це режим, коли за час роботи температура не встигає досягти сталого значення, а за час паузи двигун встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

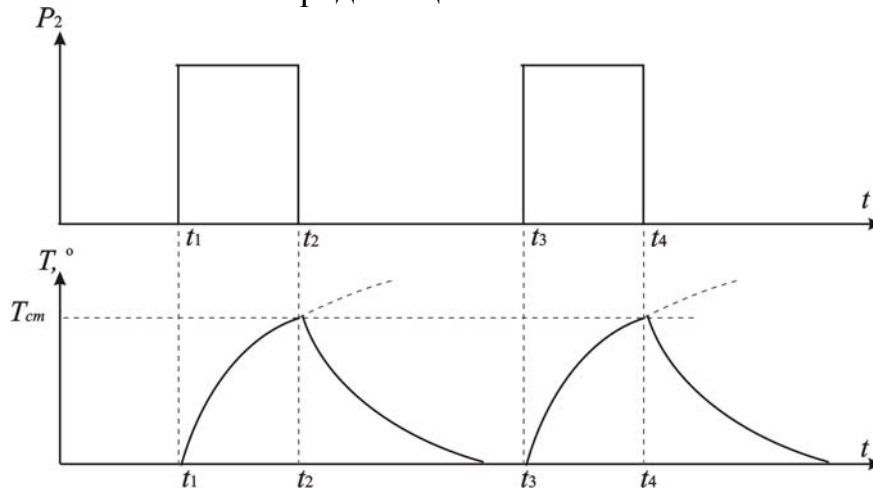


Рис. 8.2 – Діаграми зміни потужності і температури в короткочасному режимі

Повторно-короткочасний (рис. 8.3.) – це режим, коли за час роботи температура не встигає досягти сталого значення, але за час паузи двигун не встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

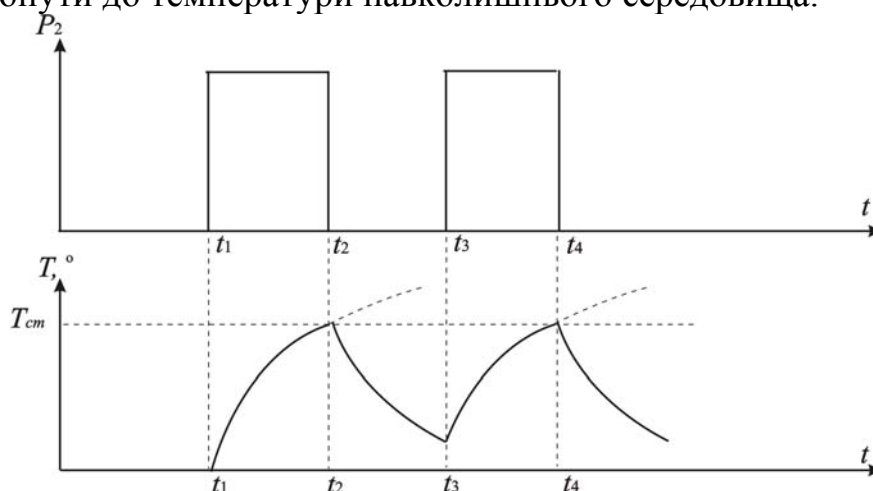


Рис.8.3 – Діаграми зміни потужності і температури в повторно-короткочасному режимі

5. За способом керування електроприводи поділяють на автоматизовані і неавтоматизовані. Більшість сучасних електроприводів є автоматизованими.

6. За кількістю швидкостей електроприводи бувають одношвидкісні і багатошвидкісні.

7. За умовами використання ЕП поділяють на стаціонарні і рухомі.

8.2. Поняття про динаміку електроприводу

Дуже велике значення має розгляд динаміки електроприводу, тобто поведінка електропривода при перехідних процесах від одного сталого режиму до іншого. Ці процеси ускладнює те, що в них беруть участь як електричні і магнітні явища, так і механічні. Важливість питань динаміки випливає з того, що перехідні процеси у ряді приводів визначають продуктивність машин (наприклад, реверсивний прокатний стан, екскаватор і ін.).

До перехідних процесів відносяться пуск, гальмування, реверс і перехід з однієї швидкості на іншу. Часто необхідно знати час перехідного процесу, швидкості переміщення рухомих частин.

Для знаходження часу перехідного процесу потрібно розв'язати рівняння руху відносно часу t

$$M_P - M_{CT} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (8.1)$$

де M_P – момент руху, M_{CT} – статичний момент; J – момент інерції; ω – кутова швидкість.

Аналітичний розв'язок рівняння (8.1) пов'язано з декількома труднощами, бо момент руху і момент інерції є складними функціями швидкості. Широко використовують наближений графоаналітичний метод розрахунку. Вихідними є графік моменту сил опору на валу електродвигуна і його механічна характеристика.

При визначенні перехідних процесів графіки моментів розбиваються на рівні ділянки зі швидкістю Δn , що визначають середні значення моментів M_P і M_{CT} . На кожній ділянці визначають час Δt , замінюючи $d\omega$ на $\Delta\omega$

$$\Delta t = \frac{J \cdot d\omega}{M_P - M_{CT}} = \frac{J \cdot \Delta n}{9550 \cdot (M_P - M_{CT})}. \quad (8.2)$$

Час пуску двигуна знаходиться як сума часів на кожній ділянці

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_k, \quad (8.3)$$

де k – кількість ділянок розбиття.

Зміну швидкості переміщення рухомих частин в часі знаходять з рівняння руху

$$\Delta\omega = \frac{M_P - M_{CT}}{J} \cdot \Delta t. \quad (8.4)$$

Швидкість визначають за (8.4) для кожної ділянки розбиття. Результати розрахунків заносять в таблицю, за якою будують графік швидкості руху у часі.

8.3. Вибір двигуна

Основним завданням при проектуванні приводу є вибір електродвигуна, сюди входить:

1. Вибір роду струму і номінальної напруги.
2. Вибір номінальної частоти обертання.
3. Вибір конструктивного виконання.
4. Вибір двигуна за потужністю.

Іноді рід струму, напруга і частота обертання визначаються виробничими умовами. Конструктивне виконання сучасних серій електродвигунів враховує наступні чинники: захист від впливу навколишнього середовища, забезпечення охолодження і спосіб монтажу. *За способом захисту* від впливу навколишнього середовища електродвигуни виготовляють у захищеному, закритому і вибухозахищеному виконанні.

Захищені від потрапляння дрібних предметів і крапель двигуни призначені для роботи в сухих непильних приміщеннях.

Закриті двигуни встановлюють у приміщеннях із підвищеною вологістю, атмосферою, забрудненою пилом із металевими включеннями, парами мастила або керосину.

Вибухозахищені двигуни мають корпус, здатний витримати вибух газу усередині машини і викид полум'я у навколишнє середовище, що виникає при цьому. Вони призначені для роботи у вибухонебезпечних приміщеннях або шахтах. На кришці клемної коробки цих двигунів відлитий рельєфний знак РВ – рудничні вибухозахищені або ВЗГ – вибухобезпечний у газовому середовищі. Без цих знаків застосування двигунів у вибухонебезпечних приміщеннях заборонено. Не можна також замість закритого двигуна встановлювати захищений.

За способом охолодження розрізняють двигуни з природним охолодженням, самовентиляцією (внутрішньою або зовнішньою) і стороннім продувом (примусове охолодження).

За способом монтажу двигуни бувають з горизонтальним розташуванням вала і станиною на лапах, із вертикальним розташуванням вала і фланцем і т.п. Двигун, що вибирається, повинний мати той самий спосіб установки, кріплення і з'єднання з механізмом, що й двигун, який замінюється.

За потужністю двигуни вибираються, насамперед, з умови припустимого нагрівання. Як уже зазначалося, при роботі двигуни нагріваються за рахунок втрат енергії. Припустимий нагрів визначається класом нагрівостійкості ізоляції обмоток даного двигуна. При цьому необхідно мати на увазі, що розрахунковий термін служби 15-20 років скорочується вдвічі, якщо температура обмоток у тривалому режимі перевищує розрахункову на 10°. Якщо температура підвищується в 1,5 рази відносно допустимої, двигун виходить із ладу через 3 години.

8.4. Поняття про автоматичне керування електродвигуном

Принципи автоматичного керування електродвигуном простіше усього розібрати на прикладі найбільш простої схеми керування асинхронним двигуном за допомогою реверсивного магнітного пускача (рис. 8.4).

Призначення схеми: забезпечення автоматичного пуску, реверсу і захисту асинхронного короткозамкненого двигуна.

Склад схеми:

1. B і H – котушки контакторів "Вперед" і "Назад" і їхні контакти – головні (в ланцюзі живлення двигуна) і допоміжні (в ланцюзі керування).
2. Кнопкова станція "Вперед", "Назад" і "Стоп".
3. Теплові реле $PT1$ і $PT2$ і їхні контакти у колі керування.
4. Автоматичний вимикач "Вкл".
5. Запобіжники $ЗП$.

Живлення двигуна і кола керування здійснюється від однієї мережі.

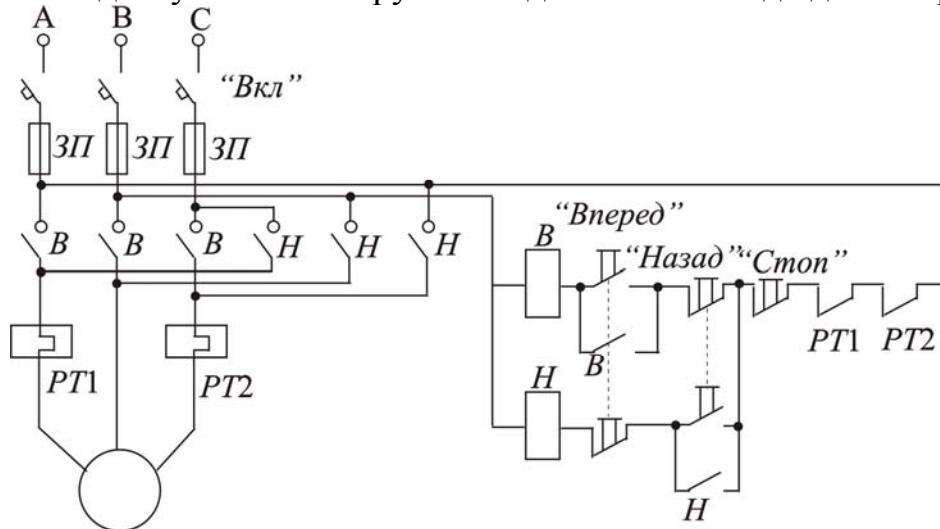


Рис. 8.4. – Схема керування асинхронним двигуном

При вмиканні вимикача "Вкл" схема готова до роботи. Натисканням кнопки, наприклад, "Вперед", вмикають котушку контактора B . Спрацювавши, він замикає свої головні контакти B и приєднує двигун до мережі. Одночасно замикається його блок-контакт B у колі керування, що шунтує кнопку "Вперед". Кнопку можна відпустити. Для зупинки двигуна натискають кнопку "Стоп". Ланцюг котушки контактора B розривається, контактор відключається і від'єднує двигун від мережі. Для запобігання від одночасного натискання кнопок "Вперед" і "Назад" вони мають механічне блокування.

Автоматичний захист двигуна від тривалих перевантажень струмом здійснюється біметалічними тепловими реле $PT1$ і $PT2$, що розмикають контакти, включені в коло живлення обмоток контакторів. При пуску двигуна виникає кидок струму. Якщо пусковий струм триватиме короткий час, теплові реле не встигають спрацювати. При перевантаженнях реле спрацьовують, вимикаючи контактор і двигун відключається від мережі. Повернення контактів після остигання біметалічної пластини робиться вручну після усунення причини перевантаження. Захист від струмів короткого замикання забезпечується плавкими запобіжниками. Вони також не спрацьовують від пускових струмів. При зникненні живлення контактор відключиться і від'єднає двигун від мережі. Це зроблено для захисту двигуна від самозапуску.

Розглянута схема є контакторно-релейною. В останній час все частіше застосовують безконтактну напівпровідникову апаратуру, побудовану на використанні тиристорів або силових транзисторів.

РОЗДІЛ 9. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ. ВИПРЯМЛЯЧІ

9.1. Загальні відомості та класифікація

Випрямлячі – це електротехнічні пристрої, що призначені для перетворення енергії джерела змінного струму в енергію напруги постійного струму.

Склад випрямляча показано на узагальненій структурній схемі, що наведена на рис. 9.1.

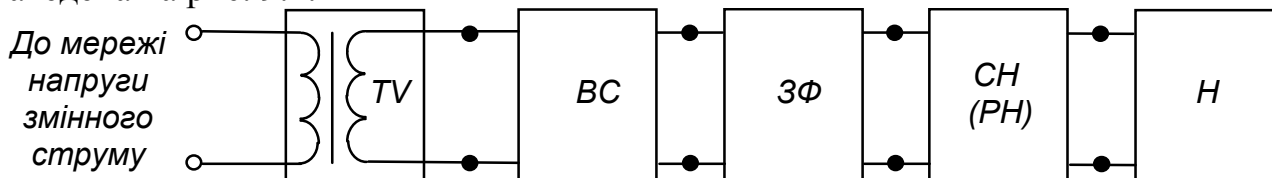


Рис. 9.1 – Структурна схема випрямляча:

TV – трансформатор напруги, *ВС* – вентильна схема, *ЗФ* – згладжувач фільтр, *РН (РН)* – стабілізатор напруги (регулятор напруги), *Н* – навантаження

Як правило, випрямляч підключається до розподільної мережі напруги змінного струму.

Трансформатор призначений для перетворення величини напруги мережі до величини, необхідної для роботи випрямляча. Він також забезпечує електричний (гальванічний) розв'язок мережі і навантаження.

Вентильна схема перетворює змінну напругу у випрямлену – пульсуючу однополярну. Вона може виконуватись на напівпровідникових ключах.

Згладжувач фільтр перетворює випрямлену напругу в постійну. Фільтри виконуються на реактивних елементах, які мають властивість накопичувати електромагнітну енергію: конденсаторах, дроселях. Такі фільтри називаються пасивними.

Для живлення радіоелектронних пристроїв часто використовують активні фільтри, які будуються на транзисторах, операційних підсилювачах та реактивних елементах.

Стабілізатор напруги підтримує напругу на навантаженні на незмінному рівні при змінах величини напруги мережі або значення навантаження у заданих межах.

Для регулювання напруги на навантаженні за необхідним законом і у заданих межах використовують регулятори напруги. Зазначимо, що стабілізатор також являє собою різновид регулятора, у якого забезпечується автоматичне регулювання за ознакою постійності значення напруги на навантаженні.

Регулятор (стабілізатор) може бути ввімкнено і зі сторони змінної напруги (до трансформатора).

Параметри вузлів випрямляча та їх елементів, режими їх роботи повинні бути узгоджені із заданими умовами роботи навантаження. Навантаження також вважають елементом випрямляча, бо зміни його значення у процесі роботи впливають на режим роботи всього пристрою.

Згладжувач фільтр, стабілізатор (регулятор), а іноді й трансформатор

можуть не входити до складу випрямляча, коли в них немає необхідності.

Крім вказаних вузлів, випрямляч може мати вузли і елементи захисту від короткого замикання, перевантаження, зниження напруги мережі та ін. (запобіжник, автоматичний вимикач, електронний пристрій захисту, елементи і вузли індикації наявності і значення напруги і струму, а також вузли діагностики працездатності).

Випрямлячі класифікують за числом фаз – однофазні та багатофазні (останні – найчастіше трифазні). За потужністю – бувають малої потужності (до 100 Вт), середньої (до 10 кВт) і великої (понад 10 кВт).

Є некеровані випрямлячі та керовані. Перші будуються на некерованих вентилях – на діодах, другі – на керованих – наприклад, на тиристорах.

За принципом дії випрямлячі поділяються на однокатні та двокатні.

Однокатними називають випрямлячі, у яких вторинною обмоткою трансформатора струм протікає один раз за період напруги мережі і лише в одному напрямку.

Важливим параметром випрямляча є кратність пульсацій випрямленої напруги m – відношення частоти пульсацій випрямленої напруги до частоти мережі. У однокатних випрямлячів він відповідає числу фаз мережі.

Двокатними (двопівперіодними) називають випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм за період напруги мережі протікає двічі і в різних напрямках. Кратність пульсацій у двокатних випрямлячів дорівнює подвоєному числу фаз.

Робота випрямляча фактично полягає у тому, що навантаження за допомогою ключів так підключається до джерела енергії змінного струму, щоб за час періоду його напруги струм у навантаженні протікав в одному напрямку. Виходячи з цього, найважливішим вузлом випрямляча є вентильна схема – схема випрямлення.

Найширшого розповсюдження набули схеми випрямлячів, зображені на рис. 9.2 (виходячи з того, що в якості вентилів тут використано діоди – маємо некеровані випрямлячі).

При розрахунку випрямляча відомі параметри навантаження та мережі живлення. Невідомими є параметри елементів вузлів, що до нього входять.

Теорія випрямлячів зводиться до розробки аналітичних виразів, що зв'язують відомі параметри напруги і навантаження з невідомими параметрами, які характеризують роботу вентильної схеми. На підставі цього робиться вибір типу вентилів для конкретної схеми випрямляча та розрахунок його вузлів.

9.2. Експлуатаційні характеристики випрямлячів

1) Основними експлуатаційними характеристиками є значення середньої напруги на навантаженні U_d (див. рис. 9.3) та його середнього струму I_d :

$$R_H = \frac{U_d}{I_d}.$$

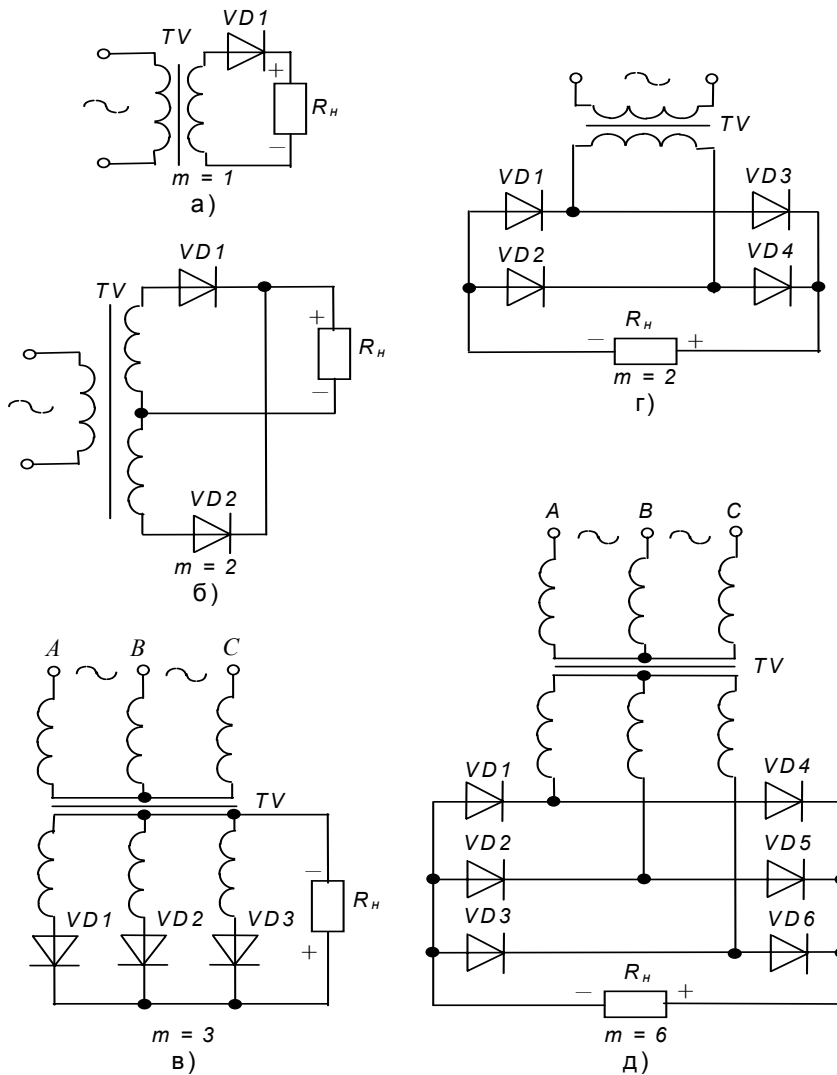


Рис. 9.2 – Випрямлячі: а-в – однокатні (з нульовим виводом), г, д – двотактні (мостові), а) однофазна однопівперіодна, б) однофазна двопівперіодна з нульовим виводом, в) трифазна з нульовим виводом (схема Міткевича) г) однофазна мостова, д) трифазна мостова (схема Ларіонова)

- 2) Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги $K_n = \frac{U_{m(1)}}{U_d}$,

де $U_{m(1)}$ – амплітудне значення основної гармоніки випрямленої напруги при розкладі останньої в ряд Фур'є.

- 3) Зовнішня (навантажувальна) характеристика $U_d = f(I_d)$.

- 4) Регульовальна характеристика $U_d = f(\alpha)$, де α – кут керування тиристорів (лише для керованих випрямлячів).

- 5) Середнє значення струму через вентиль I_a .

- 6) Амплітудне значення струму через вентиль I_{am} .

- 7) Амплітудне значення зворотної напруги, що прикладається до вентиля

$U_{в.м.}$

8) Коефіцієнт корисної дії η .

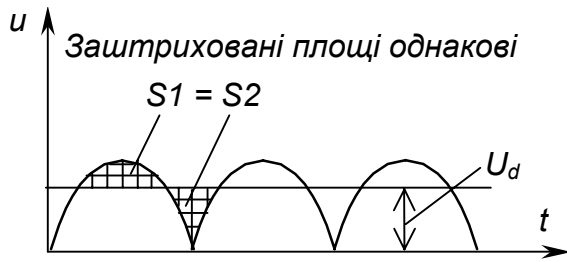


Рис. 9.3 – Ілюстрація середнього значення випрямленої напруги

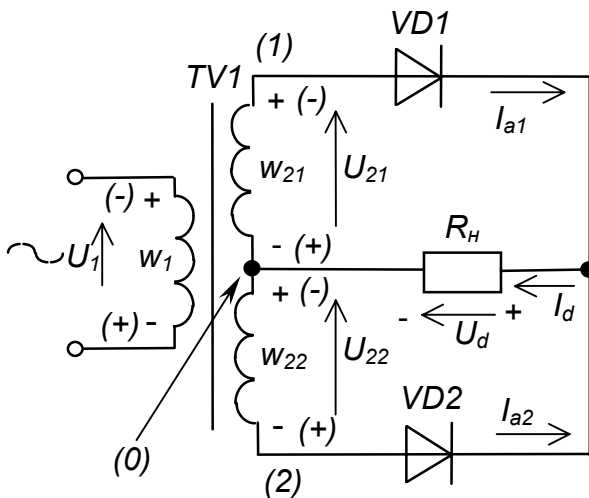


Рис. 9.4 – Однофазний випрямляч з нульовим виводом

протягом другого півперіода відімкнене від неї. Показники якості вихідної напруги та інші у цього випрямляча вкрай низькі. Тому його застосовують дуже рідко.

Більш докладно розглянемо схеми інших випрямлячів.

9.3. Робота однофазного двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом на активне навантаження

Схему однофазного випрямляча з нульовим виводом зображено на рис. 9.4.

Очевидно, що він являє собою два однопівперіодних випрямляча, що підключені до навантаження паралельно. Вторинна обмотка трансформатора має вивід від її середини – нульовий вивід (0). Тобто вона складається з двох напівобмоток, кількості витків яких однакові: $w_{21} = w_{22} = w_2$. Тоді напруги, що в них трансформуються, відносно нульової точки також однакові $|U_{21}| = |U_{22}|$, але протилежні за фазою.

Коефіцієнт трансформації трансформатора становить $n = w_1 / w_2$, де w_1 , w_2 – кількість витків первинної та половини вторинної обмоток відповідно.

9) Надійність.

Знаючи експлуатаційні характеристики різних схем випрямлячів і вимоги з боку навантаження, обирають конкретну схему. На основі параметрів 5 – 7 вибирають вентилі.

Розрізняють такі режими роботи випрямлячів:

1) на активне навантаження (R);

2) на активно-індуктивне навантаження (RL);

3) на активно-ємнісне навантаження (RC);

4) на протиелектрорушійну силу – проти-е.р.с. (E) – наприклад, коли випрямляч використовують для заряду акумуляторної батареї.

Як видно з рис. 9.2, найпростішим є однопівперіодний випрямляч, робота якого полягає в тому, що протягом одного півперіода напруги мережі навантаження підімкнене діодним ключем до вторинної обмотки трансформатора, а

Схема працює так.

За позитивної полярності напруги на обмотці w_{21} (на рис. 9.4 вказана без дужок) у провідному стані знаходиться діод $VD1$ і через нього тече струм $I_{a1} = \frac{U_{21}}{R}$ (прямим спадом напруги на діоді нехтуємо – вважаємо його за ідеальний).

На навантаженні з'являється позитивна півхвиля напруги. Діод $VD2$ при цьому закритий зворотною напругою $U_{зв} = 2 \cdot U_2$ ($|U_2| = |U_{21}| = |U_{22}|$) – зі схеми видно, що при цьому анодом він підмикається до точки (2), а катодом, через діод $VD1$ (замкнений ключ) до точки (1).

За негативної півхвилі напруги (на рис. 9.4 – у дужках) у провідному стані знаходиться діод $VD2$. Через нього тече струм $I_{a2} = \frac{U_{22}}{R}$, діод $VD1$ закритий подвійною зворотною напругою U_2 .

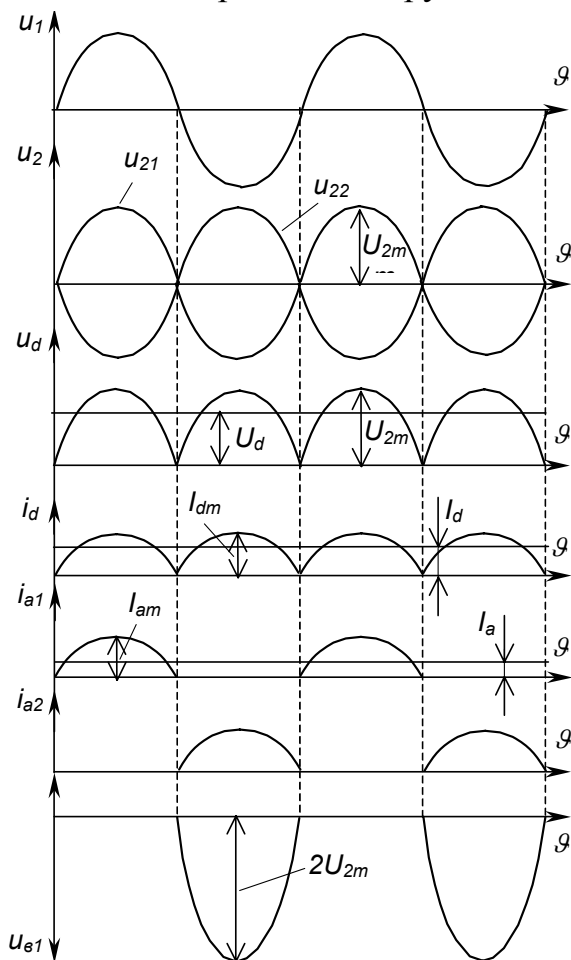


Рис. 9.5 – Часові діаграми роботи однофазного випрямляча з нульовим виводом

Таким чином, за час періоду напруги мережі струм через навантаження протікає в одному напрямку і безперервно. Досягається це в два прийоми (такти), в один з яких навантаження першим діодним ключем підмикається до першої напівобмотки трансформатора, а в другий – другим діодним ключем до другої напівобмотки.

Роботу цього випрямляча ілюструють часові діаграми, зображені на рис. 9.5. Зверніть увагу: тут і надалі показано залежності напруг і струмів не власне від часу t , а від кутової величини $\vartheta = \omega t = 2\pi f_m t$. Як побачимо далі, математичні залежності, що описують процеси у випрямлячах, також за аргумент мають ϑ . Це зроблено для того, щоб співвідношення величин були однаковими за будь-якої частоти мережі f_m .

При розрахунку випрямляча вихідними даними є: I_d , U_d , U_1 (напруга мережі), $R_n = \frac{U_d}{I_d}$, f_m .

Треба визначити:

- 1) параметри схеми, необхідні для вибору діодів – I_a , I_{am} , U_{em} ;
- 2) параметри, необхідні для вибору (розрахунку) трансформатора – U_2 , I_1 (струм первинної обмотки), I_2 (струм вторинної обмотки), n , S_T (габаритна потужність трансформатора);

3) параметри, необхідні для розрахунку фільтра.

Зробимо припущення:

1) діод ідеальний: його опір у відкритому стані $R_{np}=0$, а у закритому $R_{зб} = \infty$;

2) опір обмоток трансформатора дорівнює нулю.

Тоді матимемо наступні формули для розрахунку:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9 U_2; \quad \vartheta = 2\pi f_m t = \omega t; \quad (9.1)$$

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = 1,11 U_d; \quad (9.2)$$

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{1,11 U_d}; \quad (9.3)$$

$$I_a = \frac{I_d}{2}; \quad I_{am} = I_d \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{2} = \frac{\pi}{2} I_d = 1,57 I_d; \quad (9.4)$$

$$U_{sm} = 2\sqrt{2} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = \pi U_d. \quad (9.5)$$

Знаючи значення I_a , I_{am} та U_{sm} , обирають тип діода, параметри якого перевищують отримані розрахункові.

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(I_d \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \sin^2 \vartheta d\vartheta} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d}{2\sqrt{2}} \pi = I_d \frac{\pi}{4}; \quad (9.6)$$

$$I_1 = \frac{I_d \frac{\pi}{2\sqrt{2}}}{n} = 1,11 \frac{I_d}{n} \quad (9.7)$$

Габаритна потужність трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}, \quad (9.8)$$

де S_1 – потужність первинної обмотки трансформатора;

S_2 – потужність вторинної обмотки трансформатора.

$$S_1 = I_1 U_1 = 1,11 \frac{I_d}{n} U_1 = 1,11 \frac{I_d}{n} U_2 n = 1,11 I_d 1,11 U_d = 1,23 I_d U_d = 1,23 P_d, \quad (9.9)$$

$$S_2 = 2 I_2 U_2 = 2 I_d \frac{\pi}{4} 1,11 U_d = 1,74 I_d U_d = 1,74 P_d, \quad (9.10)$$

$$S_T = \frac{1,23 P_d + 1,74 P_d}{2} = 1,48 P_d = 1,48 I_d U_d, \quad (9.11)$$

Бачимо, що S_T перевищує P_d у півтора рази. Це в основному тому, що півобмотки трансформатора працюють не безперервно, а по черзі через кожні півперіоду.

За значеннями S_T , I_1 , I_2 , n , U_2 вибирається стандартний трансформатор або розраховується спеціальний.

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги

$$K_n = \frac{U_{m(1)}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,67, \quad (9.12)$$

де $U_{m(1)} = \frac{2U_d}{m^2 - 1}$, бо, згідно з розкладом у ряд Фур'є, амплітуда i -тої гармоніки становить

$$U_{m(i)} = \frac{2U_d}{(m^i)^2 - 1}. \quad (9.13)$$

Знаючи K_n , можна розрахувати згладжуючий фільтр.

9.4. Трифазні випрямлячі

Для живлення навантажень середньої і великої потужності використовують трифазні випрямні схеми, які мають у порівнянні з однофазними ряд переваг:

- краще використовуються вентилі за струмом;
- суттєво нижчий коефіцієнт пульсацій;
- ефективне використання габаритної потужності трансформатора;
- більш ефективне використання згладжуючих фільтрів.

До мережі трифазні випрямлячі підключаються через трифазні трансформатори, обмотки яких вмикаються зіркою або трикутником.

Найбільше розповсюдження знайшли два типи схем трифазних випрямлячів:

- 1) однопівперіодна з нульовим виводом (схема Міткевича);
- 2) двопівперіодна мостова (схема Ларіонова).

9.4.1. Схема Міткевича

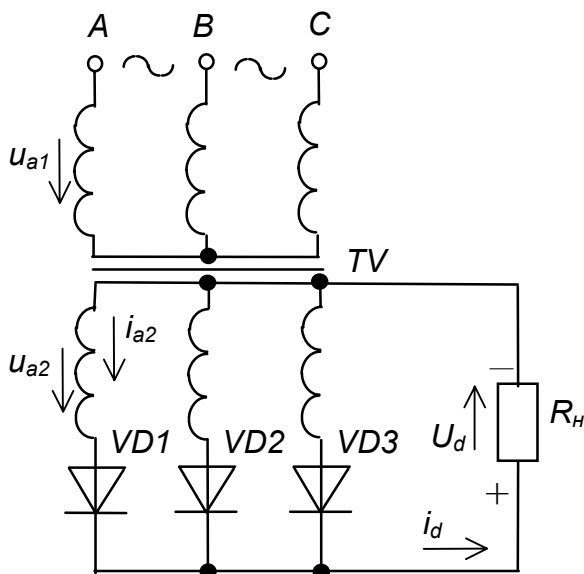


Рис. 9.6 – Трифазна схема з нульовим виводом (схема Міткевича)

Однопівперіодна схема з нульовим виводом (схема Міткевича) зображена на рис. 9.6.

Ця схема складається із трифазного трансформатора VT , випрямних діодів $VD1$ - $VD3$ та навантаження R_n , що вмикається між спільним виводом вторинних обмоток трансформатора (нульовим виводом) та спільною точкою з'єднання випрямних діодів. Фактично ця схема являє собою три однофазних однопівперіодних випрямляча, ввімкнених паралельно. Тому первинні обмотки трансформатора можуть з'єднуватись як зіркою, так і трикутником (забезпечуючи, наприклад, підключення до мережі з фазною

напругою 220 чи 127 вольт), а вторинні – лише зіркою.

Випрямні діоди працюють почергово. За період напруги живлення T кожен діод знаходиться у провідному стані третину періоду $T/3$, причому струм проводить той діод, до анода якого на даний момент прикладена найбільша позитивна фазна напруга.

Роботу схеми Міткевича ілюструють часові діаграми, наведені на рис. 9.7.

Як впливає із діаграм, наприклад, на інтервалі ϑ_1 - ϑ_2 найбільша

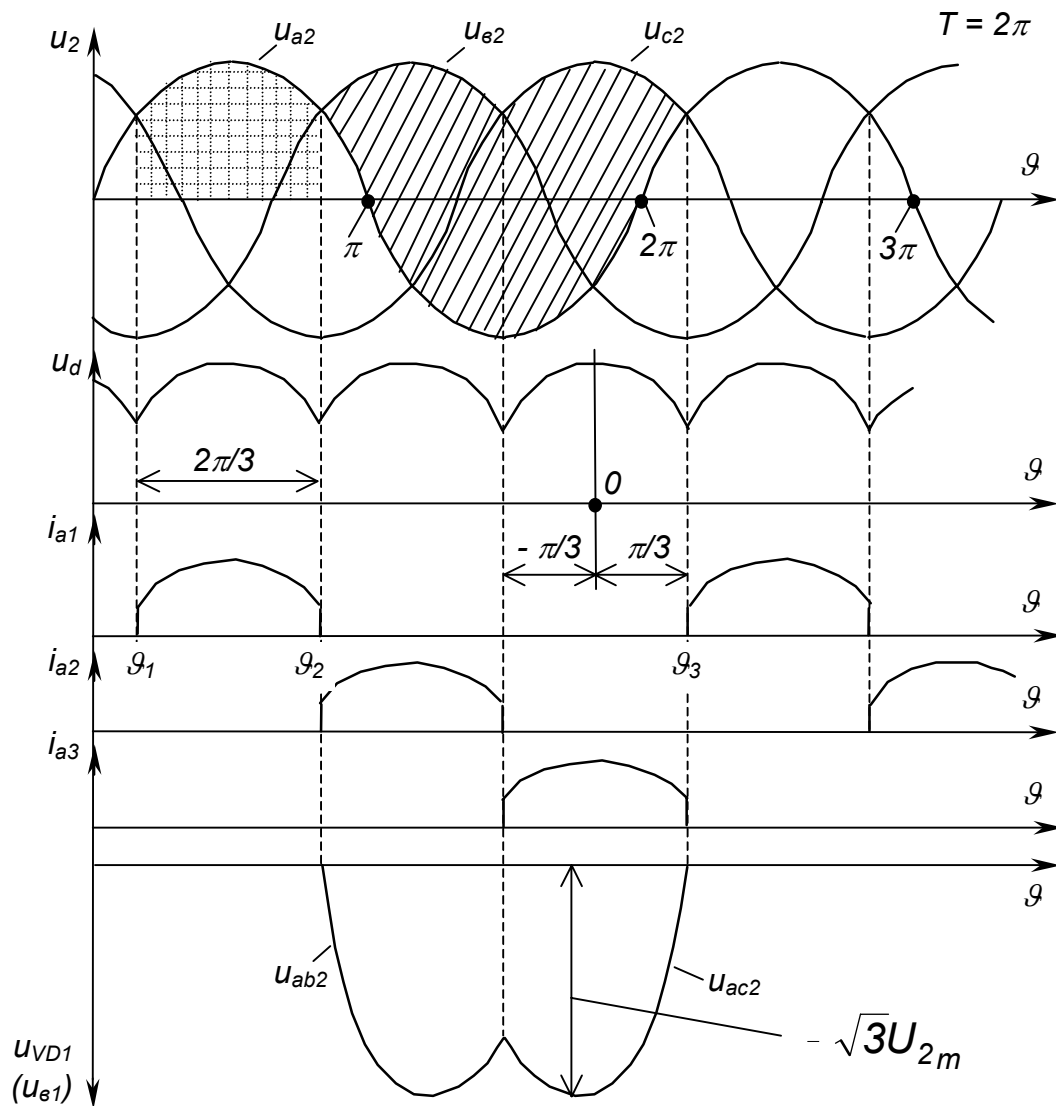


Рис. 9.7 – Часові діаграми роботи схеми Міткевича

позитивна напруга є на вторинній обмотці трансформатора фази A , тому у провідному стані тут знаходиться діод $VD1$. Проте на інтервалі ϑ_2 - ϑ_3 він закритий лінійною напругою u_{ab} або u_{ac} (даний інтервал відповідає заштрихованій скісними лініями ділянці діаграми u_2): анод має потенціал фази u_{a2} , а катод – потенціал фази, що знаходиться у провідному стані – u_{b2} або u_{c2} .

Виведемо основні розрахункові співвідношення для схеми Міткевича, для чого розглянемо діаграму напруги на навантаженні u_d на інтервалі $(-\pi/3) \div 0 \div (\pi/3)$.

$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{+\pi/3} \sqrt{2} U_2 \cos \vartheta d\vartheta = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \sqrt{3} = 1,17 U_2. \quad (9.14)$$

$$\text{Тоді} \quad U_2 = 0,85 U_d. \quad (9.15)$$

Максимальна напруга на діоді

$$U_{bm} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_2 = 2,45 U_d = 2,1 U_d. \quad (9.16)$$

Середнє значення струму через діод

$$I_a = \frac{I_d}{3}. \quad (9.17)$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$n = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_{1\phi}}{0,85 U_d}. \quad (9.18)$$

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги (при $m=3$)

$$k_n = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,25. \quad (9.19)$$

Частота пульсації випрямленої напруги у три рази перевищує частоту мережі.

Недоліком даної схеми є наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора, зумовленого тим, що, як і у будь-якої однотактної схеми, вторинною обмоткою трансформатора струм за період проходить лише один раз і в одному напрямку, тобто цей струм має постійну складову. Це вимагає використання трансформатора із підвищеним перерізом магнітопроводу (підвищеної встановленої потужності)

$$S_T = 1,48 P_d. \quad (9.20)$$

9.4.2. Схема Ларіонова

Трифазна мостова (двотактна) схема (схема Ларіонова) зображена на рис. 9.8. У цій схемі і первинна і вторинна обмотки трансформатора можуть вмикатись як зіркою, так і трикутником. Можливість вмикання вторинної обмотки двома способами забезпечує можливість отримання двох різних вихідних напруг випрямляча, значення яких відрізняються у $\sqrt{3}$ раз.

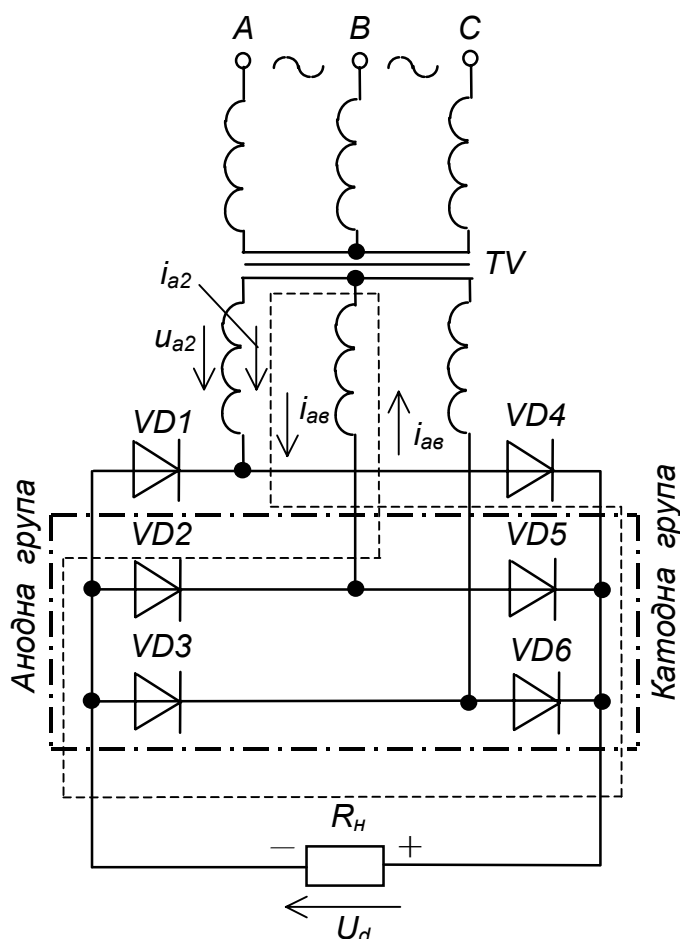


Рис. 9.8 – Трифазна мостова схема (схема Ларіонова)

найбільш негативною напругою, як, наприклад, струм i_{ae} у момент часу, що відповідає ϑ_1 , показаний на часових діаграмах, що ілюструють роботу схеми і наведені на рис. 9.9. На діаграмі u_d також вказано проміжки, на яких у провідному стані знаходяться відповідні діоди.

Час протікання струму через кожний із діодів відповідає $2\pi/3$.

Струм навантаження в даній схемі викликаний лінійною напругою.

Основні розрахункові співвідношення можна отримати із часової діаграми випрямленої напруги, наведеної на рис. 9.10.

$$U_d = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} \sqrt{3}\sqrt{2}U_2 \cos \vartheta d\vartheta = 2,34U_2, \quad (9.21)$$

$$U_2 = 0,425U_d, \quad (9.22)$$

$$U_{bm} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_2, \quad (9.23)$$

$$I_a = \frac{I_d}{3}, \quad (9.24)$$

$$K_n = \frac{2}{m^2-1} = \frac{2}{35} \approx 0,057 \text{ (для } m = 6). \quad (9.25)$$

Надалі будемо розглядати схему при вмиканні вторинних обмоток у зірку.

Тут шість випрямних діодів увімкнені у трифазну мостову схему і утворюють дві групи: анодну – $VD1, VD2, VD3$ та катодну – $VD4, VD5, VD6$.

Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів. Можна виділити три однофазних мости, що підімкнені до лінійних (у даному разі) вторинних напруг і паралельно до навантаження. Один з таких мостів на схемі обведено штрихпунктирною лінією.

У провідному стані завжди знаходяться два діоди: один з анодної групи і один з катодної. Причому струм в схемі протікає від фази з найбільш позитивною на даний момент напругою до фази з

Частота пульсації випрямленої напруги перевищує частоту мережі у шість разів.

Встановлена потужність трансформатора

$$S_T = 1,05P_d. \quad (9.26)$$

У цій схемі відсутнє підмагнічування магнітопроводу, оскільки у вторинному колі кожної обмотки трансформатора за період напруги мережі струм протікає двічі, причому у різних напрямках (див. діаграму i_{a2} на рис. 9.9).

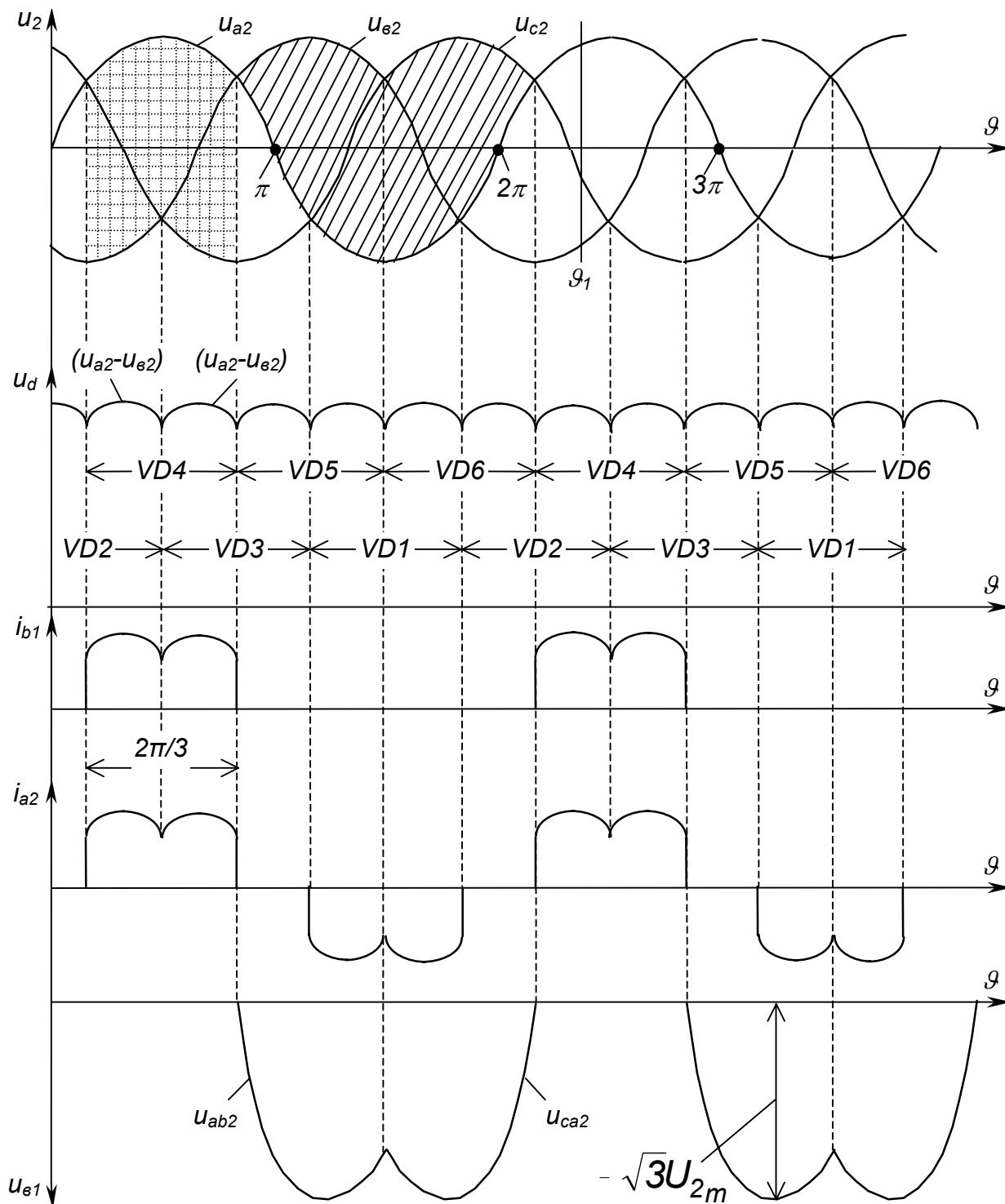


Рис. 9.9 – Часові діаграми роботи схеми Ларіонова

Схема Ларіонова у порівнянні зі схемою Міткевича має такі переваги:

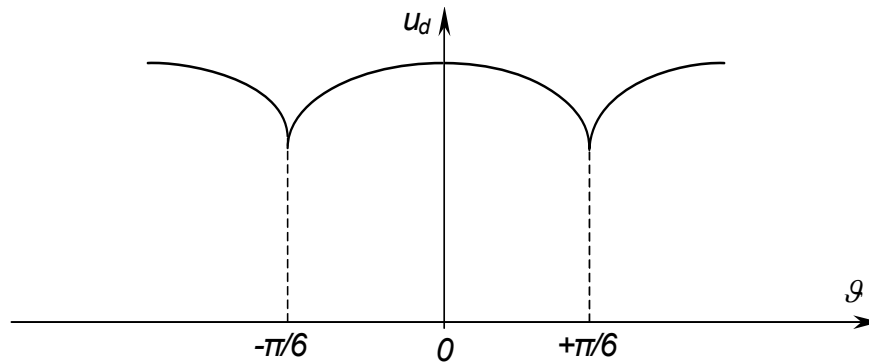


Рис. 9.10 – Розрахункова часова діаграма випрямленої напруги схеми Ларіонова

1) за рівних фазних напруг середнє значення випрямленої напруги у два рази вище (потрібно задавати меншу кількість витків вторинних обмоток трансформатора);

2) більш низький коефіцієнт пульсацій (менш ніж шість відсотків), що часто дозволяє використовувати схему Ларіонова без фільтра;

3) краще використання трансформатора за потужністю за рахунок відсутності підмагнічування осердя.

Щоправда, кількість діодів у схемі Ларіонова в два рази більша, але, як ми вже зазначали вище, на даний час це несуттєво (за винятком випрямлення малих за значенням напруг), оскільки вартість діодів невелика порівняно з вартістю трансформатора, який в схемі Міткевича повинен бути приблизно на сорок відсотків потужнішим.

9.5. Згладжуючі фільтри

Згладжуючі фільтри застосовуються для зниження рівня пульсації випрямленої напруги до рівня, що забезпечує нормальну роботу навантаження.

Найширше використання мають пасивні згладжуючі фільтри, що будуються на реактивних елементах, що мають властивість накопичувати електричну енергію – дроселях і конденсаторах, у яких значення накопиченої енергії становить

$$W_L = \frac{LI^2}{2}; -W_C = \frac{CU^2}{2}.$$

Індуктивний фільтр – це дросель, що вмикається послідовно з навантаженням. Фактично, разом з навантаженням, він являє собою частотно-залежний дільник напруги. Ефект фільтрації наявний тоді, коли опір дроселя ωL змінній складовій пульсуючого струму з найнижчою частотою значно перевищує активний опір навантаження R_n . Тоді вся постійна напруга прикладається до R_n (падіння напруги на ідеальному дроселі відсутнє), а змінні складові діляться між R_n і ωL .

Ємнісний фільтр – це конденсатор, що вмикається паралельно навантаженню. За умови, що опір конденсатора $1/\omega C$ для складової пульсуючого струму з найнижчою частотою значно менший опору навантаження R_n , забезпечується шунтування навантаження за змінним струмом: постійний струм весь протікає через R_n (конденсатор постійного струму не проводить), а змінні

складові розподіляються між R_n і $1/\omega C$.

Схеми цих фільтрів зображені на рис. 9.11.

Поряд із простими фільтрами використовуються складні, що являють собою сполучення певним чином ввімкнених дроселів та конденсаторів.

Найширшого використання набули Г-подібні LC-фільтри (одноланкові або багатоланкові), зображені на рис. 9.12.

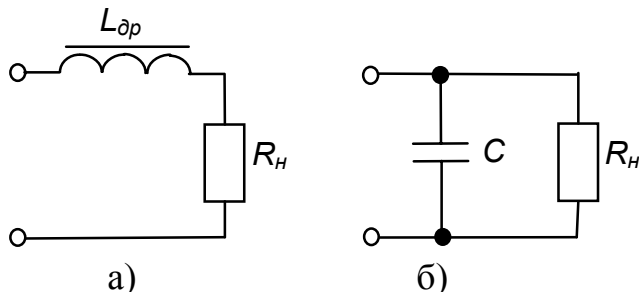


Рис. 9.11 – Індуктивний (а) і ємнісний (б) фільтри

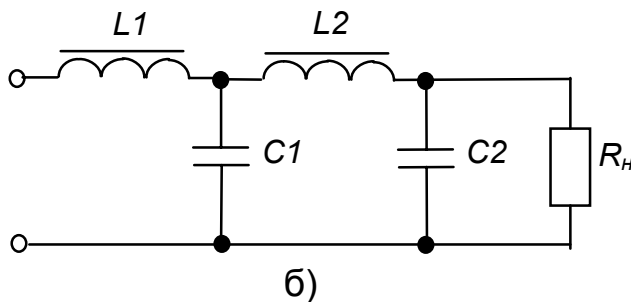
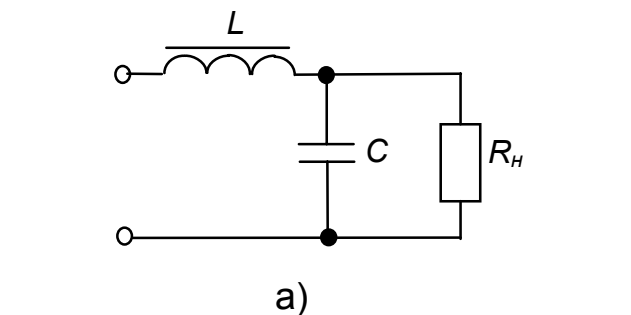


Рис. 9.12 – Г-подібні LC-фільтри: одноланковий (а) і дволанковий (б)

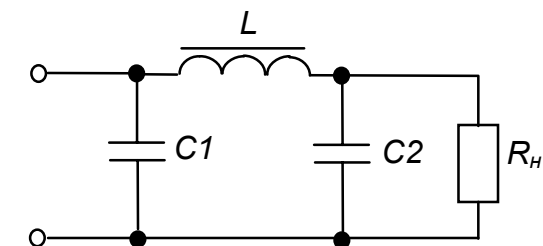


Рис. 9.13 – П-подібний LC-фільтр

На рис. 9.13 зображена схема П-подібного LC-фільтра.

Фільтри, показані на рис. 9.11,б та рис. 9.13 мають ємнісні входи, решта – індуктивні.

Ефективність роботи фільтра визначається коефіцієнтом згладжування

$$K_{3Г} = \frac{K_{нвх}}{K_{нвих}}, \quad (9.27)$$

що показує, наскільки зменшується пульсація на виході фільтра $K_{нвих}$ відносно пульсації на його вході $K_{нвх}$.

Існують також резонансні фільтри, коли індуктивність і ємність вмикаються паралельно.

Резонансна частота LC-контурів

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_\phi C_\phi}}. \quad (9.28)$$

Як правило, $\omega_0 = \omega_m = 2\pi f_m$. Опір контура на цій частоті теоретично безкінечний, тому напруга з цією частотою до навантаження не доходить.

РОЗДІЛ 10. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

10.1. Похибки електровимірювальних приладів

Вимірюванням називається знаходження значень фізичних величин дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

За способами вираження похибок вимірювальних приладів розрізняють на *абсолютну, відносну і приведену*.

Абсолютна похибка приладу Δ – це різниця між показником приладу x і дійсним значенням x_δ вимірюваної величини, тобто

$$\Delta = x - x_\delta. \quad (10.1)$$

Відносна похибка приладу δ являє собою відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини. Відносна похибка зазвичай виражається у відсотках і дорівнює:

$$\delta = \frac{x - x_\delta}{x_\delta} \cdot 100 = \frac{\Delta}{x_\delta} \cdot 100. \quad (10.2)$$

Приведена похибка γ є виражене у відсотках відношення абсолютної похибки Δ до значення величини, що нормується x_n

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100. \quad (10.3)$$

10.2. Аналогові вимірювальні прилади

Аналоговими вимірювальними приладами називають прилади, показання яких є неперервною функцією змін вимірюваної величини. Аналоговий електровимірювальний прилад – це, в першу чергу, показуючий прилад, тобто прилад, що допускає відлік показників. Для цього у всіх аналогових електровимірювальних приладів є *відліковий пристрій*, що складається із *шкали*, розташованої на циферблаті приладу, і *показчика*.

Показчик відлікового пристрою жорстко зв'язаний з рухомою частиною вимірювального механізму (для електромеханічних приладів), що здійснює перетворення вимірюваної електричної величини в кутове переміщення рухомої частини, а отже, і показчика.

У вимірювальному механізмі поворот рухомої частини здійснюється під дією виникаючого в механізмі обертаючого моменту. Значення обертаючого моменту пропорційне вимірюваній електричній величині. Для того щоб забезпечити однозначний зв'язок між кутом повороту рухомої частини і значенням вимірюваної величини, необхідно у кожному аналоговому приладі створювати *протидіючий момент*, пропорційний куту повороту рухомої частини механізму.

Характер руху рухомої частини, а отже, і показчика до сталого положення відіграє в приладах істотну роль, що визначає швидкодію приладу. Тому у всіх аналогових приладах передбачено різні пристрої для створення оптимального заспокійливого моменту.

Наявність рухомої частини у вимірювальному механізмі вимагає застосування спеціальних опорних пристроїв, що створюють відносно малий момент тертя.

Таким чином, незалежно від призначення аналогового електровимірювального приладу та від різновиду застосовуваного в ньому вимірювального механізму, будь-який прилад містить загальні для всіх аналогових приладів вузли й елементи: *відліковий пристрій, пристрої, що створюють протидіючий й заспокійливий моменти, опорний пристрій*. Крім того, спільними для всіх аналогових приладів є технічні вимоги, обумовлені відповідними державними стандартами. Нижче розглядаються технічні вимоги до аналогових приладів, а також конструкції та особливості роботи всіх вказаних вище пристроїв.

10.2.1. Технічні вимоги

Загальні технічні вимоги до всіх аналогових і цифрових приладів, а також до мір електричних величин і вимірювальних перетворювачів сформульовані в ДСТ 30012.1-2002 «Прилади аналогові електровимірювальні показуючі прямої дії і допоміжні частини до них». На підставі ДСТ 30012.1-2002 розроблено та введено в дію часткові державні стандарти на окремі види електровимірювальної апаратури, наприклад ДСТ 8711-93(2002) «Особливі вимоги до амперметрів і вольтметрів», ДСТ 8476-93(2002) «Особливі вимоги до ватметрів і варметрів», ДСТ 8039-93(2002) «Особливі вимоги до фазометрів» і т.д. Державні стандарти на окремі види апаратури встановлюють різні класи точності приладів. Так, ДСТ 8711-93(2002) для амперметрів і вольтметрів встановлює наступні класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 і 5,0. Крім того, дозволяється випуск амперметрів і вольтметрів класу точності 0,3.

Класи точності приладів встановлюються за основною приведеною похибкою. Найбільше чисельне значення основної приведенної похибки приладу кожного даного класу не повинне перевищувати чисельного значення цього класу. Наприклад, для приладу класу 0,2 чисельне значення найбільшої основної приведенної похибки не повинне перевищувати $\pm 0,2\%$.

Крім того, у державних стандартах для кожного даного класу точності приладу регламентуються *похибки від варіації показників* і зміни показників приладу від різних зовнішніх факторів (нахил приладу, температура навколишнього середовища, зовнішні магнітні й електричні поля та ін.).

Вимоги до електричної міцності та опору ізоляції між ізольованими від корпусу за постійним струмом електричними колами приладів встановлюються відповідними державними стандартами. Крім того, регламентується час заспокоєння рухомої частини приладів.

Час встановлення показників, обумовлений часом заспокоєння рухомої частини, у абсолютної більшості аналогових приладів не повинен перевищувати 4 с. Це означає, що з моменту подачі вимірюваної величини на вхід приладу або з моменту зміни цієї величини, положення покажчика відлікового пристрою встановлюється не більш ніж через 4 с. Винятком є термоелектричні та електростатичні прилади, для яких найбільший час встановлення показників не перевищує 6 с.

Відповідно до вимог державних стандартів, аналогові показуючі прилади повинні витримувати навантаження напругою або струмом, рівним 120% кінцевого значення, протягом 2 годин. Регламентуються також короточасні (ударні) перевантаження приладів струмом і напругою. Так, для амперметрів класів точності 0,5–5,0 передбачена можливість перевантаження струмом, рівним $10 \cdot I_H$, протягом 0,5 с.

Для всіх приладів за значеннями впливаючих кліматичних і механічних величин ДСТ 30012.1-2002 встановлює сім різних груп. Регламентуються значення кліматичних і механічних величин для кожної групи приладів, як при робочих умовах застосування, так і при транспортуванні і зберіганні приладів (граничні умови). Так, четверта група засобів вимірювання має наступні кліматичні робочі умови застосування: нижнє значення температури навколишнього повітря $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхнє $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, найбільша відносна вологість повітря 90% при температурі $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та атмосферному тиску 86–106 кПа.

Принцип дії приладу, можливість його роботи в тих або інших умовах, можливі граничні похибки приладу встановлюються за умовними позначеннями, нанесеними на циферблаті приладу.

10.2.2. Відлікові пристрої

Вище зазначалося, що відліковий пристрій засобу виміру обов'язково має шкалу, нанесену на циферблат приладу. Технічні вимоги до циферблатів і шкал приладів встановлені ДСТ 5365-83.

На шкалу (рис. 10.1) наносяться позначки, зазвичай у вигляді короткої вертикальної риски, що відповідають деяким значенням вимірюваної величини. Інтервал між двома сусідніми позначками шкали називають *розподілом шкали*. Позначки шкали, у яких проставлені числа (на шкалі на рис. 10.1 це числа 0; 2; 4; 6; 8 і 10), називають *числовими позначками шкали*. Шкали можуть бути *рівномірними* (розподіл постійної довжини) і *нерівномірними* (розподіл непостійної довжини). На рис. 10.1 зображено нерівномірну шкалу. Найменше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називається *початковим значенням шкали* x_n . У нашому випадку (рис. 10.1) $x_n=0$. Найбільше значення вимірюваної величини, зазначене на шкалі, називають *кінцевим значенням шкали* x_k . Для шкали, зображеної на рис. 10.1, $x_k=10$. За шкалою приладу можна визначити *діапазон показників приладу* і *діапазон вимірювань приладу*. *Діапазоном показників* називають область значень шкали, обмежену кінцевим і початковим значеннями шкали. У розглянутому випадку діапазон показників дорівнює 0-10.

Область значень вимірюваної величини, для якої нормовані допустимі похибки засобу вимірювань, називають *діапазоном вимірювань*. Зазвичай при рівномірній шкалі діапазон вимірювань і діапазон показників збігаються. Однак, при нерівномірній шкалі діапазон показників не збігається з діапазоном вимірювань. Для визначення діапазону вимірювань на шкалах таких приладів, зазвичай, ставлять крапку на початку та кінці діапазону вимірювань, якщо найбільше значення вимірюваної величини діапазону вимірювань не збігається з кінцевим значенням шкали. На шкалі, зображеній на рис. 10.1, діапазон вимірювань дорівнює 2-10.

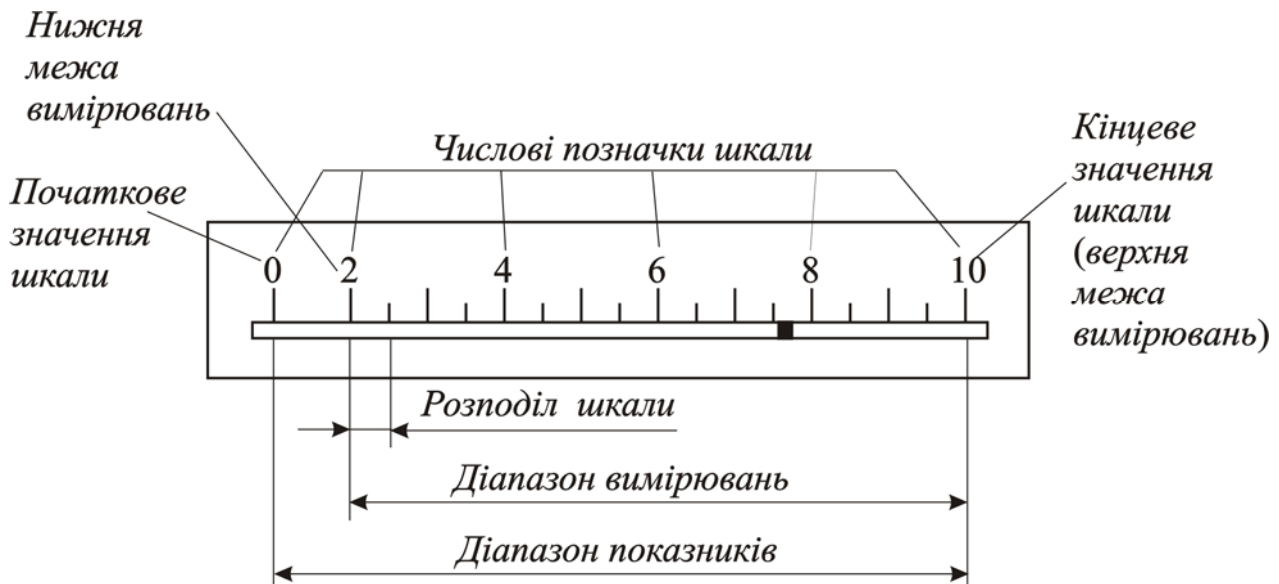


Рис. 10.1 – Шкала приладу з оптичним відліковим пристроєм

Найменше значення діапазону вимірювань (у нашому випадку числова позначка 2) називають *нижньою межею вимірювань*, а найбільше значення діапазону вимірювань – *верхньою межею вимірювань*. На розглянутій шкалі верхня межа вимірювань збігається з кінцевим значенням шкали і дорівнює 10.

Відлік значення вимірюваної величини за шкалою приладу здійснюється за допомогою покажчика. Розрізняють два види покажчиків: покажчик у вигляді стрілки, кінець якої виконаний у формі, що забезпечує відлік показників із необхідною точністю, або світловий покажчик у вигляді променя світла, що утворює на шкалі світлову пляму з індексом, за яким роблять відлік показників. Вимоги до форми й розмірів частини, що показує, стрілок і індексів світлових покажчиків встановлені ДСТ 3051-69.

У приладах зі світловим покажчиком на рухомій частині вимірювального механізму встановлюється невелике дзеркальце. Промінь світла, створюваний звичайною мініатюрною лампочкою розжарювання за допомогою найпростішої оптики, відбиваючись від дзеркальця рухомої частини, попадає на вузьку смужку матового скла, розташованого на циферблаті під шкалою, і утворює світлову пляму з індексом нитковидного типу (рис. 10.1). При повороті рухомої частини повертається жорстко скріплене з нею дзеркальце і, відповідно, переміщується під шкалою відлікового пристрою світлова пляма з індексом, вказуючи значення вимірюваної величини.

У приладах з покажчиком у вигляді стрілки, жорстко скріпленої з рухомою частиною вимірювального механізму, відлік значення вимірюваної величини здійснюється за положенням вказуючої частини стрілки біля шкали приладу. Форма вказуючої частини стрілки повинна забезпечувати відлік показників з необхідною точністю.

Залежно від форми вказуючої частини стрілок, найпоширенішими стрілками є клиноподібні (рис. 10.2, а), ножові (рис. 10.2, б) і стрижневі (рис. 10.2, в).

В лабораторних приладах підвищених класів точності за використання показників у вигляді стрілки, зазвичай ножового типу, для зменшення похибки відліку від паралакса, що виникає через те, що кут зору експериментатора щодо площини шкали приладу відрізняється від прямого, застосовують спеціальні пристрої.

Найбільшого поширення набули так звані відлікові пристрої з дзеркальною шкалою (рис. 10.3).

На циферблаті 1 під шкалою встановлюється на всю довжину шкали вузька смужка дзеркала 2. Експериментатор перед проведенням відліку зіставляє відбиття стрілки в дзеркалі зі самою стрілкою 3. Тільки після цього, тобто після усунення паралаксу, здійснюється відлік за шкалою приладу.

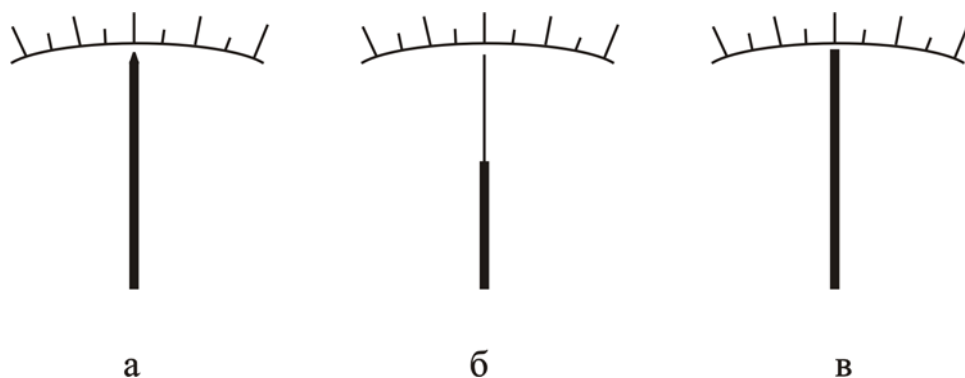


Рис. 10.2 – Відлікові пристрої стрілочних приладів
а – з клиноподібною стрілкою; б – з ножовою стрілкою;
в – з стрижневою стрілкою

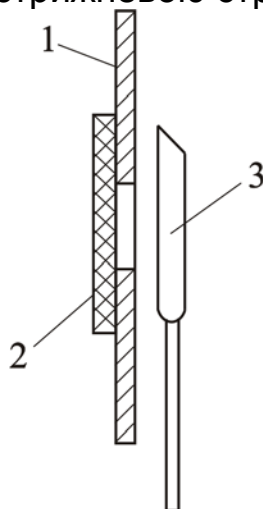


Рис. 10.3 – Відліковий пристрій з дзеркальною шкалою

10.2.3. Пристрої для створення протидіючого моменту

Протидіючий момент у аналогових вимірювальних приладах створюється в більшості випадків двома способами – за допомогою *протидіючих пружин* або *розтяжок*.

Протидіючі пружини виконуються у вигляді спіралі з бронзи за ДСТ 9233-79. Один кінець спіральної пружини, внутрішній, прикріплюється до рухомої частини вимірювального механізму, а інший, зовнішній, – до нерухомої частини

приладу. Таким чином, обертаючий момент, що виникає у вимірювальному механізмі, закручує протидіючу пружину доти, доки він не буде дорівнювати протидіючому моменту. Найчастіше для створення протидіючого моменту застосовують не одну, а дві пружини, встановлюючи їх з різних боків рухомої частини вимірювального механізму. У випадку застосування двох спіральних пружин, останні зазвичай використовуються також для підведення струму до рухомої частини приладу.

Розтяжки (ДСТ 9444-74) являють собою металеві стрічки шириною від 0,08 до 0,35 мм і товщиною від 0,01 до 0,04 мм. У якості матеріалу для виготовлення розтяжок застосовують різні види бронзи, платини, а також кобальт-нікель-хромові сплави. Звичайно, використовуються дві розтяжки, що встановлюють із двох сторін рухомої частини. Таким чином, розтяжки не тільки створюють протидіючий момент при повороті рухомої частини під дією обертаючого моменту, але й закріплюють (розтягують) рухому частину. При застосуванні розтяжок немає необхідності у використанні спеціальних опорних пристроїв (керлах, підп'ятниках), що потрібні при застосуванні протидіючих пружин.

Наявність двох розтяжок дозволяє використовувати їх для підведення струму в рухому частину вимірювального механізму.

У реальних приладах одна з розтяжок, так само як і зовнішній кінець однієї із спіральних протидіючих пружин, прикріплюється не до нерухомої частини приладу, а до спеціального гвинта, що кріпиться на корпусі приладу і називається *коректором*. Поворот коректора на деякий кут у той або інший бік дозволяє змінювати початкове положення рухомої частини приладу і тим самим встановлювати показчик вимкненого приладу на нульову позначку. Застосування розтяжок, що виготовляються на основі сучасної технології, дозволяє запобігти тертю в опорах і підвищити чутливість вимірювальних механізмів.

10.2.4. Пристрої для створення заспокійливого моменту

Рухома частина, а отже, і показчик відлікового пристрою займають певне положення, що відповідає значенню вимірюваної величини тільки тоді, коли обертаючий момент дорівнює моменту протидіючому. При будь-якій зміні вимірюваної величини змінюється обертаючий момент і, отже, порушується рівність між значеннями обертаючого й протидіючого моментів. Рухома частина вимірювального механізму під дією різниці названих моментів почне переміщуватися в ту або іншу сторону доти, доки не буде рівності між значеннями обертаючого й протидіючого моментів. Час, необхідний для цього, називають *часом заспокоєння* рухомої частини приладу.

Для забезпечення необхідного часу заспокоєння рухомої частини в аналогових приладах застосовують різні пристрої, що створюють заспокійливий момент. До них відносяться *повітряний, магнітоіндукційний або рідинний заспокоювачі*.

Повітряний заспокоювач (рис. 10.4, а) застосовується, головним чином, у приладах старих розробок, що мають рухому частину на осі із протидіючими пружинами. Він являє собою закриту камеру 1, всередині якої переміщується

при русі рухомої частини легке алюмінієве крило 2, жорстко закріплене на осі 3 рухомої частини вимірювального механізму. Між алюмінієвим крилом 2 і корпусом 1 є невеличкий зазор. При русі крила повітря переміщується з однієї частини камери в іншу, створюючи заспокійливий момент, що сприяє оптимальному заспокоєнню рухомої частини приладу.

Магнітоіндукційний заспокоювач (рис. 10.4, б) складається з нерухомого постійного магніту 1 з магнітопроводом 2 (можливе застосування декількох постійних магнітів) і крила заспокоювача 3, жорстко скріпленого з рухомою частиною приладу. Крило заспокоювача виконане з немагнітного матеріалу, зазвичай алюмінію.

При відхиленні рухомої частини, а отже, і крила заспокоювача, в останньому при перетинанні поля постійного магніту наводяться вихрові струми. Взаємодія цих струмів з полем постійного магніту створює заспокійливий момент.

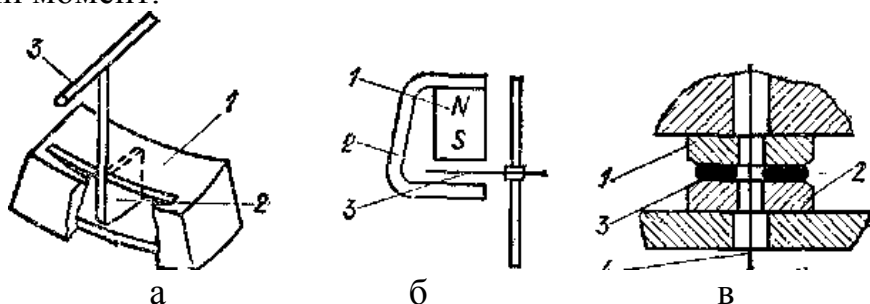


Рис. 10.4 – Заспокоювачі

а – повітряний; б – магнітоіндукційний; в – рідинний

Магнітоіндукційний заспокоювач за конструкцією простіший повітряного заспокоювача і більш зручний при регулюванні заспокійливого моменту. Однак застосування магнітоіндукційного заспокоювача можливе лише у приладах, де поле постійного магніту не буде істотно впливати на роботу вимірювального механізму.

Рідинний заспокоювач застосовується, головним чином, у приладах, що мають малі розміри за висотою, однак останнім часом його стали застосовувати також у приладах звичайного габариту. Рідинний заспокоювач (рис. 10.4, в) складається із двох дисків. Диск 1 закріплюється на рухомій частині приладу, а диск 2 – на нерухомій частині. Проміжок між дисками зазвичай становить 0,1–0,15 мм. Між дисками заливається спеціальна маловисихаюча кремнійорганічна рідина 3. Рідина в проміжку утримується поверхневим натягом. Для запобігання витікання рідини із проміжку поверхні дисків, що зіштовхуються з рідиною, ретельно поліруються.

Завдяки певній в'язкості застосовуваної рідини при відхиленні рухомої частини, тобто при обертovому русі диска 1 щодо диска 2, через тертя між шарами рідини виникає заспокійливий момент.

Рідинний заспокоювач застосовується, головним чином, у приладах, в яких рухома частина закріплена на розтяжках. Розтяжка 4 проходить крізь невеликі отвори, зроблені в дисках.

Аналогові вимірювальні прилади розділяються на електромеханічні і електронні. В залежності від засобу перетворення електромагнітної енергії у

механічну електромеханічні прилади розділяються на шість систем: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, індукційну і електростатичну.

10.3. Електронні аналогові вимірювальні прилади

Ці прилади являють собою засоби вимірювань, в яких перетворення сигналів вимірювальної інформації здійснюється за допомогою аналогових електронних пристроїв. Показники цих приладів є безперервною функцією зміни вимірюваної величини.

Електронні вимірювальні перетворювачі та пристрої у якості вихідних пристроїв використовують магнітоелектричні механізми або електронно-променеві трубки.

Найбільш широко серед аналогових електронних вимірювальних приладів використовуються електронні вольтметри, осцилографи, частотоміри, фазометри, аналізатори спектру, прилади для вимірювань параметрів електричних і електронних схем (опорів, ємностей, індуктивностей).

Прилади, що випускаються промисловістю, поділяються на 20 підгруп, які позначають прописними буквами, наприклад, (*підгрупа В*: В2 – вольтметри постійного струму, В3 – вольтметри змінного струму, В4 – вольтметри імпульсного струму, В7 – вольтметри універсальні; *підгрупа Г*: Г3 – генератори гармонійних коливань низькочастотні, Г4 – генератори гармонійних коливань високочастотні, Г5 – генератори імпульсів; *підгрупа Е*: Е3 – вимірювачі індуктивності, Е6 – вимірювачі опорів, Е7 – вимірювачі ємностей; *підгрупа З*: З – універсальні осцилографи, З7 – осцилографи швидкісні, стробоскопічні; *підгрупа Ф*: Ф2 – вимірювачі фазового зсуву; *підгрупа Ч*: Ч3 – частотоміри електронно-рахункові).

У позначенні комбінованого приладу, призначеного для виміру декількох величин, до основного позначення підгрупи прийнято додавати букву К.

10.3.1. Електронні вольтметри

До складу електронних вольтметрів входять підсилювачі постійної та змінної напруг, перетворювачі змінної напруги у постійну (випрямлячі) і постійної у змінну (інвертори), дільники напруги. У якості вихідних пристроїв найчастіше використовується магнітоелектричний вимірювальний механізм.

Метрологічні характеристики вольтметра (чутливість, діапазон частот вимірюваних напруг) визначаються типом і характеристиками підсилювача.

Електронні вольтметри постійної напруги у якості вихідного вимірювального механізму мають магнітоелектричні мікроамперметри зі струмом повного відхилення 50-500 мкА та опором рамки 500-1000 Ом. Структурну схему електронного вольтметра постійного струму наведено на рис. 10.5. Вимірювана напруга U_x подається на вхідний пристрій, що являє собою багатограничний високоомний поділювач на резисторах. Із поділювача напруга надходить на підсилювач напруги постійного струму і далі – на вимірювальний механізм. Поділювач і підсилювач постійного струму доводять рівень напруги до значень, необхідних для нормальної роботи вимірювального механізму.



Рис. 10.5 – Структурна схема електронного вольтметра постійного струму

Вхідний опір електронного вольтметра становить зазвичай кілька десятків мегаомів. Це дозволяє робити виміри в високоомних колах без помітного споживання потужності від об'єкта виміру. Діапазон вимірюваних напруг складає від десятка мілівольтів до декількох кіловольтів. Для вимірювань малих за значеннями напруг використовують мікрвольтметри з перетворенням постійного струму в змінний. У таких приладах підсилення вимірюваного сигналу здійснюється на змінному струмі, що дозволяє досягти більших значень коефіцієнта підсилення і знизити поріг чутливості до декількох мікрвольт. Робочий діапазон електронних мікрвольтметрів лежить у межах 10^{-8} -1 В.

Електронні вольтметри змінного струму виготовляють за двома схемами, що представлені на рис. 10.6.

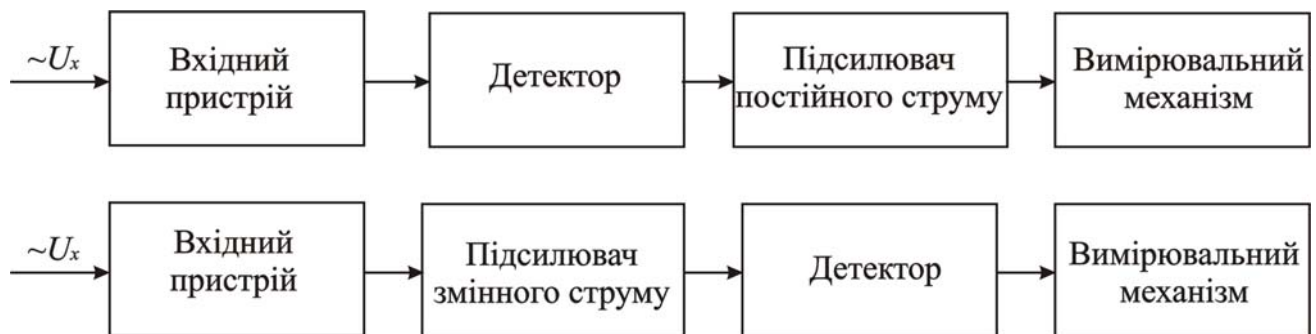


Рис. 10.6 – Структурні схеми електронних вольтметрів змінного струму

У першій з цих схем вимірювана змінна напруга спочатку перетворюється в постійну за допомогою детектора, а потім підвищується підсилювачем напруги постійного струму і діє на вимірювальний механізм. У другій схемі підсилення відбувається на змінному струмі, а потім попередньо підсилений сигнал випрямляється детектором і відхиляє стрілку вимірювального механізму. За першою схемою можуть будуватися вольтметри з широким частотним діапазоном (10 Гц - 1000 МГц), але вони не здатні вимірювати напруги за значенням більші декількох десятків часток вольт. Друга схема дозволяє створювати чутливі вольтметри, нижня межа вимірювань яких становить одиниці мікрвольт. Однак ці прилади мають менший частотний діапазон.

Переваги електронних вольтметрів

- 1) Великий вхідний опір (більше 1 МОм).
- 2) Мале споживання потужності.
- 3) Висока чутливість.
- 4) Широкий діапазон вимірюваних напруг (від десятків нановольтів на постійному струмі до десятків кіловольтів на змінному).
- 5) Працюють у широкому частотному діапазоні – до сотень МГц.

До *недоліків* електронних вольтметрів можна віднести необхідність окремого джерела живлення та складність конструкції.

10.3.2. Електронно-променевий осцилограф

Електронно-променевий осцилограф – це прилад, призначений для візуального спостереження електричних процесів, представлених у формі напруги, а також вимірювань параметрів сигналів, що визначають їх миттєві значення і часові характеристики. Крім того, осцилограф може бути використаний для вимірювань фазового зсуву між двома синусоїдними напругами, частоти і складових комплексного опору.

Електронний осцилограф має високу чутливість, широкий частотний діапазон і малі власні споживання потужності. Осцилографи мають такі класи точності: 1 клас ($\pm 3\%$); 2 клас ($\pm 5\%$); 3 клас ($\pm 10\%$); простий клас ($\pm 12\%$). Точність вимірювань залежить від розміру робочої частини екрана та ширини променя і вказується для випадку, коли розміри зображення займають не менш 30% розміру екрана.

Сучасний універсальний осцилограф має смугу пропускання до 350 МГц і діапазон амплітудних значень сигналів від мілівольтів до сотень вольтів.

За призначенням і галуззю застосування універсальні осцилографи поділяються на багатофункціональні зі змінними блоками, широкосмугові, низькочастотні, двопроменеві, прецизійні, польові. За допомогою деяких осцилографів можна вимірювати частоту, струм, напругу, температуру.

10.4. Цифрові вимірювальні прилади

Цифровий вимірювальний прилад (ЦВП) – це прилад, в якому вхідний сигнал перетворюється у дискретний вихідний сигнал і представляється в цифровому вигляді. Під дискретним сигналом розуміється переривчастий сигнал, в якому інформація міститься не в інтенсивності носія сигналу (наприклад, у значенні напруги, струму), а у числі елементів сигналу (наприклад, у числі імпульсів напруги) та їхньому взаємному розташуванні в часі і просторі. Систему таких сигналів для подання інформації називають кодом. Вимірювана величина, що подається на вхід ЦВП, є величиною безперервною, тобто на кінцевому інтервалі вона має незліченну безліч значень. Безперервну величину часто називають аналоговою величиною. Процес перетворення аналогової величини у цифрову називається аналогово-цифровим перетворенням, а перетворювач, що здійснює це перетворення – аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

Узагальнена функціональна схема ЦВП представлена на рис. 10.7. Вимірювана величина $x_{\text{вм}}$ подається на вхідний пристрій *ВП*, призначений для масштабного перетворення вхідної величини та відділення її від завад. АЦП перетворює величину x в код N , що подається на цифровий відліковий пристрій *ЦВП*, де відображається у вигляді ряду цифр або виводиться на зовнішній пристрій. Як пристрій керування *ПК* в сучасних ЦВП використовуються мікроконтролери.

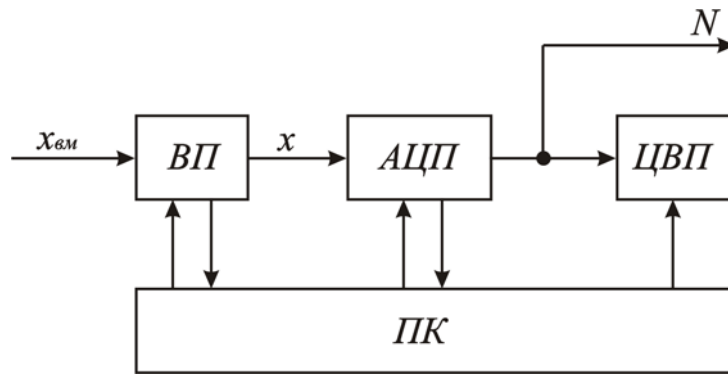


Рис. 10.7 – Узагальнена функціональна схема ЦВП

АЦП широко застосовують для зв'язку первинних перетворювачів електричних і неелектричних величин з мікропроцесорами та іншими пристроями накопичення й обробки результатів спостережень.

За видом вимірюваних величин ЦВП діляться на:

1. Вольтметри постійного та змінного струму.
2. Омметри та мости постійного та змінного струму.
3. Комбіновані прилади.
4. Вимірювачі частоти та інтервалів часу.
5. Спеціалізовані ЦВП, призначені для вимірювань температури, маси вантажів, швидкостей та ін.

10.4.1. Цифрові вольтметри постійного та змінного струму

Цифрові вольтметри (ЦВ) постійного струму становлять найпоширенішу групу ЦВП. Вони дозволяють вимірювати напруги від 1 мкВ до 1000 В з похибкою 0,01-0,1% при входному опорі 10^9 - 10^7 Ом. Аналогово-цифрові перетворювачі в ЦВ будуються на основі різних методів перетворення, однак найчастіше застосовують методи врівноваженого перетворення і методи інтегрування. АЦП врівноваженого перетворення мають високу швидкодію, високу точність перетворення й низьку завадостійкість. АЦП двотактного інтегрування за порівняно невисокої швидкодії мають високу точність і високу завадостійкість.

Переваги ЦВ

- 1) Висока точність вимірювань.
- 2) Широкі межі вимірювань.
- 3) Значна швидкодія.
- 4) Можливість обробки результату вимірювань за допомогою комп'ютера.

10.4.2. Цифрові осцилографи

Можна виділити наступні переваги цифрового осцилографа у порівнянні з електронно-променевим:

- висока точність вимірювань;
- яскравий добре сфокусований екран на будь-якій швидкості розгортки;
- можливість відображення сигналу до моменту запуску;
- можливість зупинки оновлення екрану на довільний час;
- можливість детектування імпульсних завад;

- автоматичні засоби вимірювань параметрів сигналів;
- можливість підключення принтера для створення звітів вимірювань;
- можливість статистичної обробки сигналу;
- засоби самодіагностики та самокалібрування;
- різко обкреслені контури зображення сигналу;
- можливість детального дослідження перехідних процесів;
- зчитування попередньо записаних даних;
- широкі аналітичні можливості й спрощена архівація;
- можливість порівняння попередньо записаних даних з поточними.

Цифрові осцилографи випускаються або у вигляді самостійних приладів, або у вигляді приставки до персонального комп'ютера (ПК). Пристрої на основі ПК відносяться до нового напрямку у вимірювальній техніці – віртуальні прилади. Тепер фахівцеві достатньо підключити до комп'ютера додатковий пристрій (модуль цифрового осцилографа) для того, щоб почати вимірювання і аналіз фізичної величини. При цьому програмна частина віртуального приладу емулює передню керуючу панель стаціонарного вимірювального пристрою. Комп'ютерною мишкою та клавіатурою здійснюється керування приладом за допомогою спеціальних програм, обробка інформації, що надійшла, а також її зберігання на накопичувачі (жорсткому диску).

Тими ж можливостями володіють осцилографи з рідкокристалічним дисплеєм (РКД). Всі можливості, пов'язані з автоматизацією вимірювань, вбудовані в цифровий осцилограф.

РОЗДІЛ 11. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В БУДІВНИЦТВІ

11.1. Поняття системи електропостачання, категорії споживачів електроенергії

Згідно з правилами влаштування електроустановок (ПВЕ) *системою електропостачання* (СЕС) називається сукупність електроустановок, призначених для забезпечення споживачів електричною енергією.

У загальному вигляді системою електропостачання може вважатися сукупність джерел та систем перетворення, передачі і розподілу електричної енергії. До систем електропостачання висувають наступні вимоги:

1. Надійність системи і безперебійність електропостачання споживачів.
2. Якість електроенергії на вводі до споживача.
3. Безпека обслуговування елементів СЕС.
4. Уніфікація (модульність, стандартизація).
5. Економічність (включає в себе такі поняття, як енергоефективність та енергозбереження).
6. Екологічність.
7. Ергономічність.

Споживачами електроенергії (СЕЕ) у будівництві є будівельні майданчики, допоміжні підприємства з виробництва бетону, розчину, лакофарбових покриттів, ремонтні цехи, освітлювальні і побутові установки. Споживачі електричної енергії отримують її з розподільних мереж від енергетичних систем, від систем електропостачання промислових підприємств і міст, до яких примикають будівельні майданчики або власних електростанцій.

Електропостачання *об'єктів будівництва* (ОБ) в основному здійснюється від трансформаторних підстанцій (ТП). На ОБ споживачами електроенергії є будівельні крани, екскаватори, верстати в ремонтних майстернях та ін. Будівельні майданчики (БМ) поділяються на великі (будівництво великих підприємств або їх комплексів), середні (будівництво середніх підприємств), дрібні (будівництво житлових будинків, об'єктів соціально-культурного призначення).

Електроприймачами (ЕП) є електродвигуни приводів будівельних машин і механізмів, технологічні установки електропрогрівання бетону, нагрівачі, зварювальні агрегати, випрямляючі пристрої, високочастотні установки, електричні лампи освітлювальних установок, радіоелектронна апаратура.

Усі приймачі можуть бути підімкнені до розподільної мережі однієї напруги або до електричних мережі(ЕМ) різних напруг.

Електричні мережі підприємств з виробництва будівельних матеріалів відносяться до мереж постійного використання і на них поширюються вимоги до *електричних мереж промислових підприємств* (ЕМПП). Технологічні процеси на цих підприємствах в основному повинні бути автоматизовані.

ЕМПП можуть бути мережами постійного та тимчасового використання.

ЕМПП від підстанції або районних мереж (РЕМ) енергосистеми відносяться до мереж постійного використання. Від ТП будівельного майданчика електричні мережі, як правило тимчасові.

За надійністю електропостачання електроприймачі поділяються на три категорії.

До першої категорії належать ЕП і комплекси електроприймачів, перерва в електропостачанні яких може спричинити значний збиток, пошкодження основного устаткування, масовий брак продукції, розлад технологічного процесу. Ці приймачі повинні мати можливість забезпечення електроенергією не менше ніж від двох незалежних джерел живлення. Порушення електропостачання допускається тільки на час автоматичного відновлення електропостачання від другого джерела.

Всередині першої категорії виділяється особлива група електроприймачів. До неї відносяться найбільш відповідальні ЕП і їх комплекси, безперебійне електропостачання яких необхідне для підтримки технологічного процесу в робочому режимі, нехай навіть зі зниженою продуктивністю, або для безаварійного зупинення технологічного процесу з метою запобігання загрози для життя людей, вибухів, пожеж, аварій на технологічному обладнанні. Ці приймачі у нормальному режимі роботи повинні забезпечуватись електроенергією не менше ніж від трьох незалежних джерел живлення. Порушення електропостачання допускається тільки на час автоматичного відновлення.

До другої категорії відносяться ЕП і їх комплекси, перерва у електропостачанні яких призводить до масового недовипуску продукції, простоїв робітників і механізмів. Вони повинні забезпечуватися електроенергією від двох незалежних джерел живлення. Перерва у електропостачанні допускається на час, необхідний для автоматичного або оперативного перемикавання на друге джерело.

До третьої категорії відносяться ЕП і їх комплекси, що не потрапляють під визначення першої та другої категорій. Електропостачання тут може здійснюватися від одного джерела живлення. Перерва електропостачання допускається на час проведення відновлювальних робіт, але не більше однієї доби.

Споживачі електроенергії за надійністю і безперебійністю електропостачання класифікуються у залежності від категорії надійності ЕП, що входять до складу споживачів. При цьому враховується переважно наявність ЕП тієї чи іншої категорії.

Електричні мережі будівельних майданчиків (ЕМБМ) являють собою сукупність електроустановок для передачі та розподілу електроенергії, що складаються з трансформаторних підстанцій та розподільчих пристроїв, з'єднаних електричними лініями, що забезпечують їхній зв'язок з приймачами електроенергії.

Електричні мережі розрізняються за родом струму, напругою, режимами нейтралі, конструктивними ознаками. В основному мережі виконуються за системою трифазного змінного струму частотою 50 Гц. Ця система дозволяє здійснювати трансформацію електроенергії та передачу її на далекі відстані. У мережах змінного струму широко застосовують однофазні відгалуження до однофазних електроприймачів. В ЕМ можуть включатися установки підвищеної

(до 10 кГц) і високої (вище 10 кГц) частоти з метою забезпечення надійної роботи окремих технологічних установок (нагрів металу під загартування, ковку, штампування, плавку металів). Для електропостачання окремих технологічних установок (електролізних, гальванічних, електроприводів підйомно-транспортних механізмів, верстатів) необхідний постійний струм. Для перетворення слугують двигун-генератори, випрямлячі.

В ЕМБМ застосовують в основному напругу 380/220 В, що відноситься до низьковольтної напруги (до 1 кВ), і напруги 6, 10, 35 і 110 кВ, що відносяться до високовольтної напруги (вище 1 кВ).

У ЕМБМ *лінії електропередач* (ЛЕП) можуть бути повітряними або кабельними. ЕМ та електроустановки у *системах електропостачання* (СЕР) можуть бути з *заземленою* або *ізольованою нейтраллю*.

Електричними мережами від джерел до ЕП передається не тільки активна енергія, що перетворюється в інші види, але і реактивна енергія. Передача реактивної енергії ЕМБМ призводить до підвищених втрат електроенергії в мережах і до додаткових витрат на оплату електроенергії.

При проектуванні та реконструкції систем електропостачання об'єктів необхідно знати електричні навантаження в електричних мережах. На підставі розрахунку електричних навантажень виконується розрахунок і вибір електричних мереж, комутаційних і захисних апаратів, джерел живлення, перетворювальних установок та інших електротехнічних пристроїв. Перевірка правильності вибору електричних мереж і електричних пристроїв за нагрівом і втратами напруги, розрахунок показників якості електроенергії, показників надійності систем електропостачання здійснюється на основі розрахунку електричних навантажень.

11.2. Система електропостачання об'єктів будівництва

СЕР об'єктів будівельного виробництва – це сукупність електроустановок і пристроїв, призначених для виробництва, передачі і розподілу електроенергії, її обліку та контролю показників її якості. Електроустановки для виробництва та передачі електроенергії можуть бути власністю підприємства будівельного виробництва або належати іншому підприємству чи об'єднанню.

Будівельні підприємства можуть мати власну електростанцію і забезпечувати електроенергією всі технологічні установки і процеси, передавати електроенергію власними електричними мережами. Підприємства можуть одержувати електроенергію від електроустановок (електростанцій і підстанцій), що належать центральній енергосистемі або сусідньому промислового підприємству.

Найбільш поширеною схемою є схема, за якою підприємства отримують електроенергію від районних електричних мереж (РЕМ) регіональної енергосистеми.

Більшість електроприймачів технологічних установок ОБ, побутових установок будівельних майданчиків (БМ) призначені для роботи за напруги до 1 кВ. Перетворення електроенергії відбувається на підстанціях споживачів, а її розподіл – розподільними мережами за напруги 0,4 кВ.

На рис. 11.1 наведено схему електропостачання ОБ від генераторів власної електростанції (рис. 11.1, а) і від РЕМ (рис. 11.1, б).

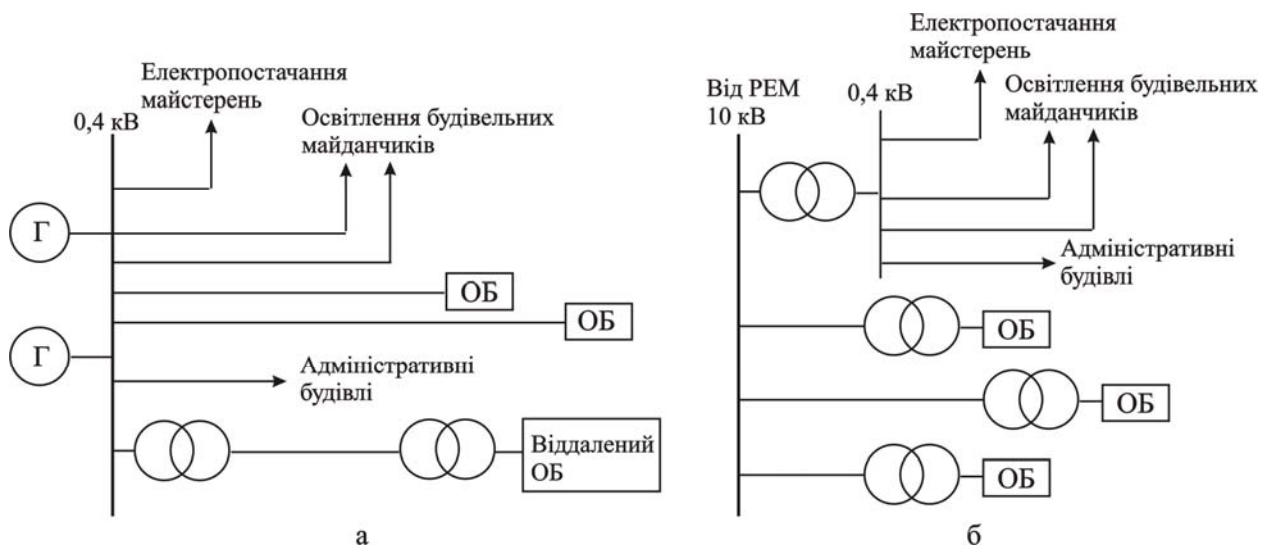


Рис. 11.1 – Системи електропостачання об'єктів будівництва:
а – від генераторів власної електростанції, б – від районної енергомережі

Представлена система електропостачання підприємств є складною системою. Її можна розділити на систему (підсистему) зовнішнього електропостачання, систему внутрішнього електропостачання і систему внутрішньоцехового електроспоживання. У той же час СЕП підприємства будівельного виробництва є підсистемою енергосистеми і підсистемою технологічної системи виробництва на цьому підприємстві. Це означає, що електроенергія, що передається районними електричними мережами в СЕП, розглядається як одна із складових виробничого процесу поряд з сировиною, матеріалами, трудовитратами.

У систему зовнішнього електропостачання входить сукупність електроустановок та пристроїв між вузловим розподільчим пунктом енергосистеми і знижувальні ТП самого підприємства. В системі зовнішнього електропостачання підприємства застосовуються, в основному, напруги 6-35 кВ.

Система внутрішнього електропостачання великого ОБ, порівняного до промислового підприємства (наприклад, заводи залізобетонних конструкцій) характеризується великою розгалуженістю розподільної мережі, що має повітряні і, в основному, кабельні лінії, велику кількість розподільних пунктів (РП), ТП, комутаційних апаратів. Розподіл електроенергії в системі внутрішнього електропостачання здійснюється при напругах 6, 10 кВ. До системи внутрішнього електропостачання дрібних ОБ входять електричні мережі низької напруги від електростанції або ТП до вводу в цех або технологічні установки.

Система внутрішнього об'єктового електропостачання будівельного майданчика являє собою електричні мережі напругою 380/220 В.

Система внутрішньоцехового електропостачання виробничих майстерень включає в себе цехові мережі, виконані кабелями і проводами з комутаційними і захисними апаратами, від розподільчого щита (пункту) до електроприймачів. Розподіл електроенергії в системі внутрішньоцехового електропостачання виконується при напругах 380/220 В.

11.3. Електричні мережі будівельних майданчиків

Сукупність електроустановок для передачі та розподілу електроенергії на певній території, що складається з підстанцій, ЛЕП та розподільчих пристроїв називається електричною мережею.

Мережею живлення називають електричну мережу (лінію), що підводить електроенергію до розподільних пунктів або підстанцій.

Розподільною мережею називають електричну мережу, що підводить електричну енергію від джерела живлення до споживчих ТП або електроприймачів.

Схема електропостачання будівельного майданчика демонструє зв'язок між джерелами живлення і приймачами електроенергії. У якості джерела електропостачання району, як правило, вибирається державна або районна енергосистема. Передача електроенергії до розподільних пунктів або підстанцій здійснюється лініями живлення.

На рис. 11.2,а показано схему електропостачання будівництва великого промислового підприємства, що включає ГПП і кілька споживчих підстанцій (ТП). Джерелом живлення є енергосистема. Електропостачання може здійснюватися від підстанції районної енергосистеми (рис. 11.2, б). Розподіл електроенергії до електроприймачів на напругу до 1000 В здійснюється розподільними мережами низької напруги (рис. 11.2, в).

Можливе електропостачання будівельних майданчиків і виробництв від суміжних джерел живлення, наприклад, від енергосистеми і від власної електростанції (рис. 11.2). У якості власної електростанції може використовуватися, наприклад, енергопоїзд.

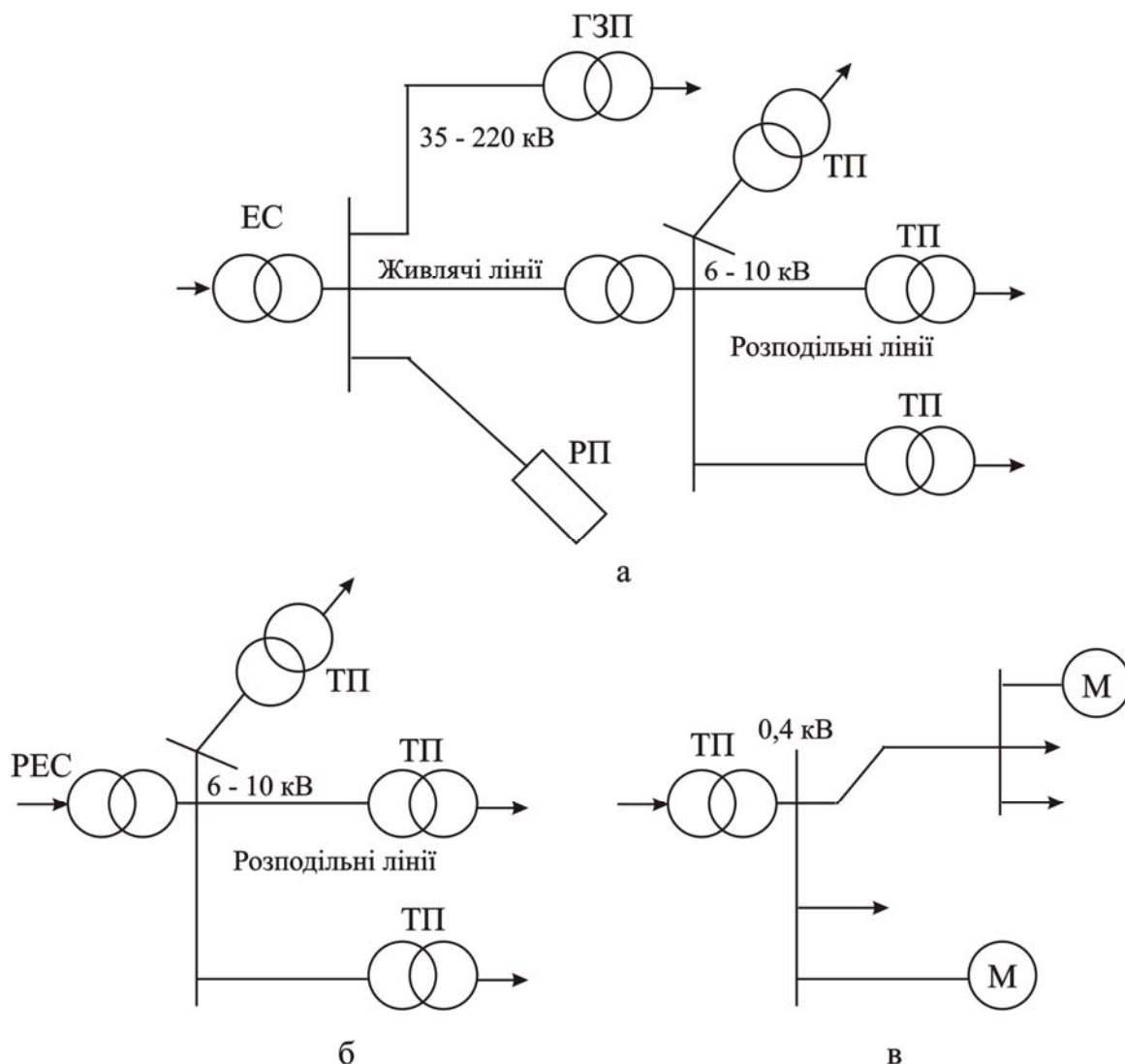


Рис. 11.2 – Схема електропостачання будівельних майданчиків:
а – від енергосистеми; б – від районної енергосистеми; в – від споживчої підстанції: ЕС – енергосистема; ГЗП – головна знижувальна підстанція; ТП – трансформаторна підстанція; РЕС – районна енергосистема; РП – розподільний пункт; М – навантаження

Напруга на шинах РП від енергосистеми і власної електростанції при цьому має збігатися (рис. 11.3, а). При розбіжності напруг застосовується трансформація напруги від енергосистеми через трансформатори Т1 і Т2 (рис. 11.3, б). Можливе електропостачання при двосторонньому живленні.

Схеми електропостачання з двостороннім живленням підвищують надійність електропостачання, оскільки при пошкодженні однієї з ліній електропостачання споживачів, що живляться від пошкодженої лінії, відновлюється від другої лінії через секційний вимикач на стороні нижчої напруги.

Напруга електричних мереж в системі внутрішнього електропостачання може бути 6, 10 і 20 кВ. Найбільш поширеною є напруга 10 кВ. Вона є більш економічною у порівнянні з напругою 6 кВ за рівнем втрат потужності і напруги у мережах.

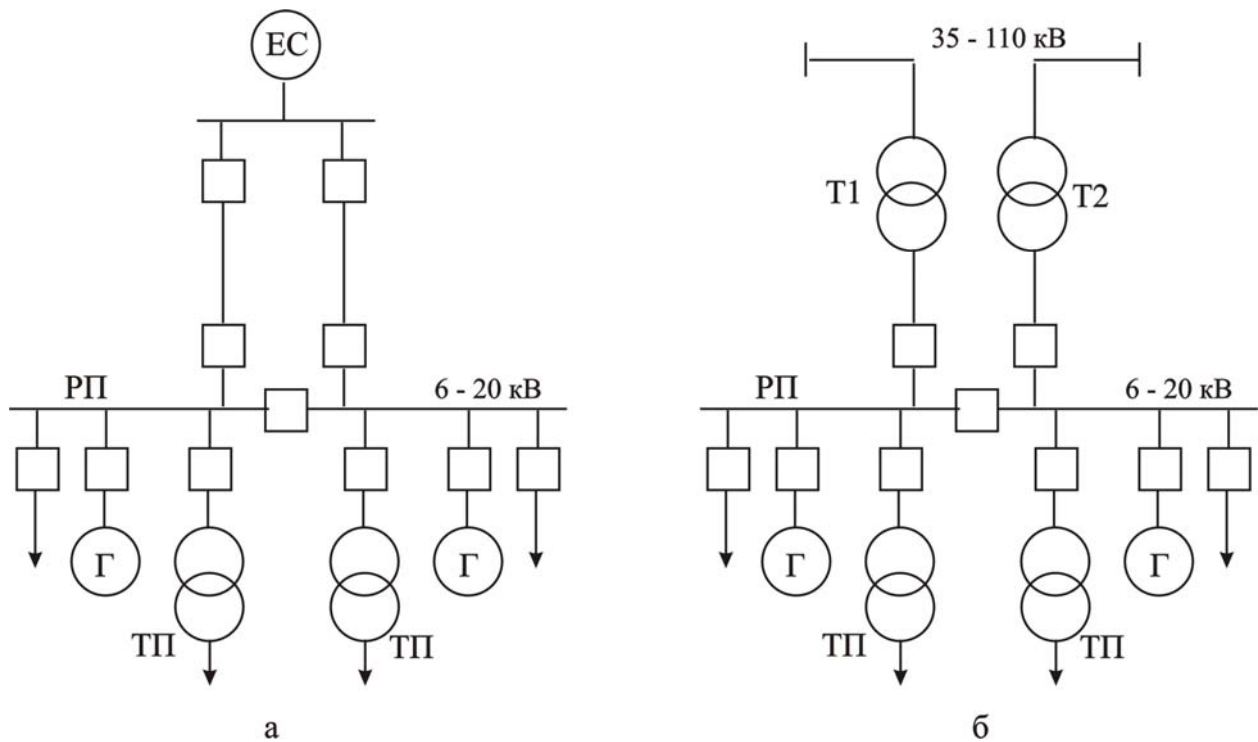


Рис. 11.3 – Схема електропостачання від енергосистеми і власної електростанції: а – на однаковій напрузі; б – з трансформацією напруги;
 ЕС – енергосистема; РП – розподільний пункт;
 ТП – споживча трансформаторна підстанція; Г – генератор електростанції;
 Т1, Т2 – знижуючі трансформатори

Напруга 6 кВ використовується в системах, де перехід на напругу 10 кВ вважається нераціональним у зв'язку із заміною трансформаторів і електроприймачів (наприклад, електродвигунів). Напругу 20 кВ поки застосовує тільки в мережах, близьких від електростанцій з генераторною напругою 20 кВ.

Передача електроенергії від джерела живлення до РП, ТП або окремих електроприймачів може здійснюватися за радіальною (рис. 11.4, а), магістральною (рис. 11.4, б), або змішаною схемою, що поєднує елементи радіальних і магістральних схем.

Радіальні схеми мають високу надійність. Лінії електропередач за цими схемами відходять від джерела живлення «за радіусами» до РП або ТП.

Недоліком схеми є те, що при аварійному відключенні живлячої лінії може виявитися знеструмленою велика група споживачів. Цей недолік усувається застосуванням резервування.

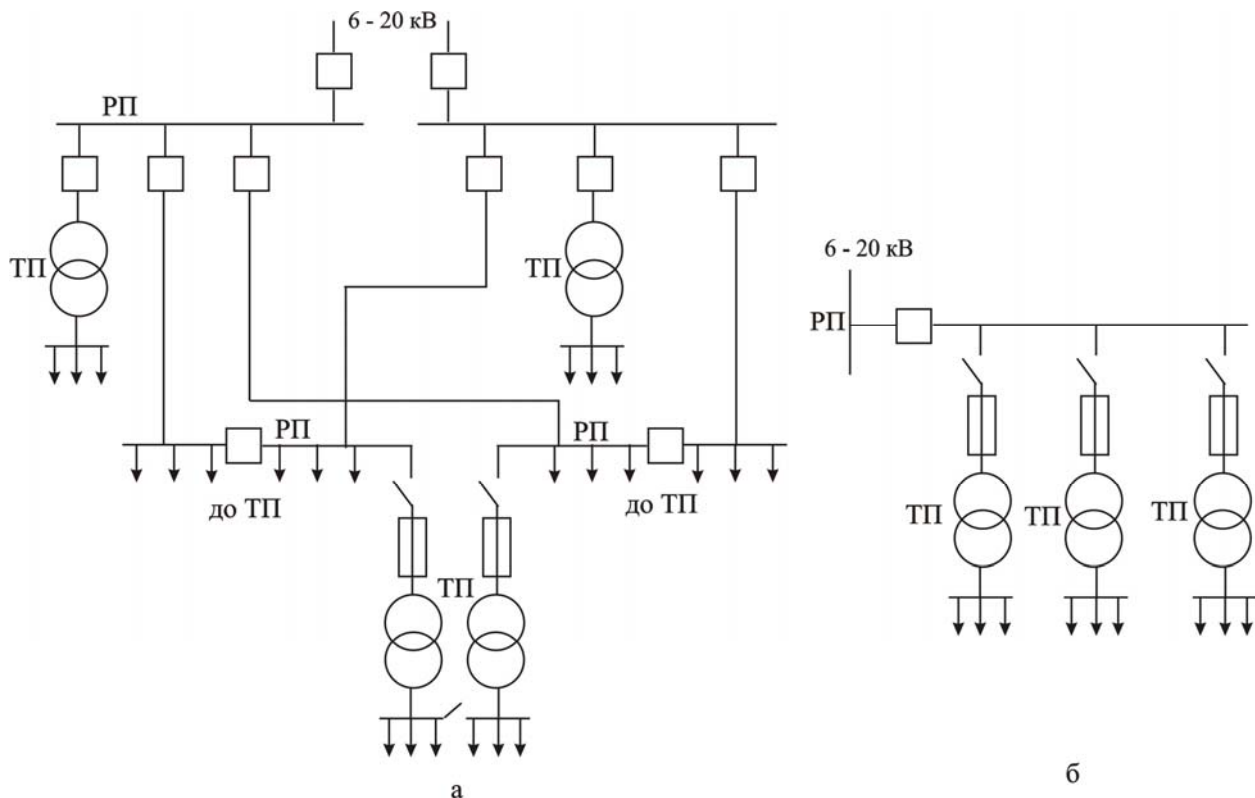


Рис. 11.4 – Схема розподілу електроенергії: а – радіальна; б – магістральна

При магістральній схемі одна живляча магістраль обслуговує кілька ТП або РП. Розподіл енергії здійснюється шляхом виконання відгалужень від повітряної або кабельної лінії до окремих підстанцій. Живлення ТП можна здійснити шляхом почергового введення ЛЕП спочатку від РП до однієї ТП, потім від неї до іншої ТП і т. д. При магістральних схемах зменшується протяжність мереж, кількість вимикачів на РП, знижуються втрати потужності в мережах, витрати на спорудження мереж. Недоліком магістральних схем є зниження надійності у порівнянні з радіальними схемами, бо при пошкодженні магістралі знеструмленими виявляються всі споживачі, що живляться від неї.

Надійність електропостачання підвищується при застосуванні двотрансформаторних підстанцій і використанні наскрізних подвійних магістралей (рис. 11.5). У цьому випадку від кожної секції РП дві магістралі заводяться почергово на кожну секцію двохтрансформаторної підстанції ТП. Якщо на шинах низької напруги ТП застосувати пристрій автоматичного резервування, наприклад, на автоматичних вимикачах, то при виході з ладу будь якої живлячої магістралі вищої напруги електроенергія подаватиметься споживачам за другою магістраллю шляхом автоматичного перемикання на секціях шин низької напруги. Такі перемикання називаються автоматичним вмиканням резерву (АВР).

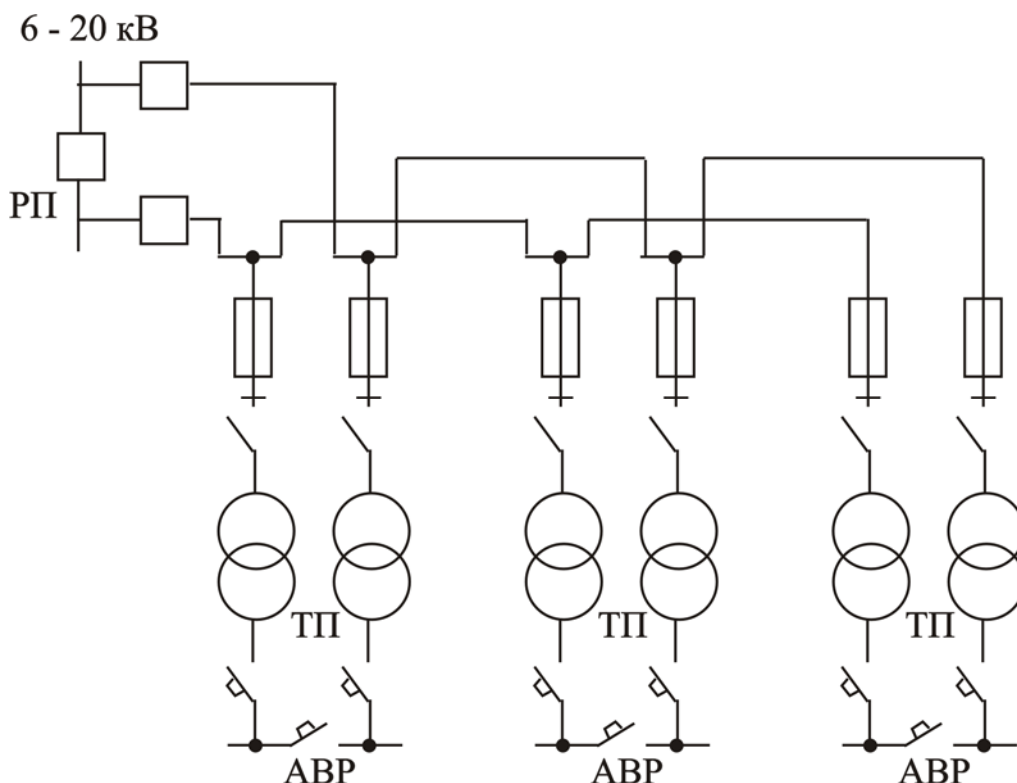


Рис. 11.5 – Розподіл електричної енергії наскрізними подвійними магістралями: РП – розподільний пункт; ТП – трансформаторна підстанція; АВР – автоматичне вмикання резерву

Розподіл електроенергії в мережах до 1 кВ. Схема електропостачання об'єктів будівництва залежить від їх категорії за надійністю і безперебійністю електропостачання. Для електропостачання виробничих електроприймачів застосовують радіальні, магістральні і змішані схеми.

Магістральна схема застосовується для живлення декількох електроприймачів окремого технологічного агрегату, або невеликої кількості дрібних електроприймачів, не пов'язаних технологічним процесом (рис. 11.6, а).

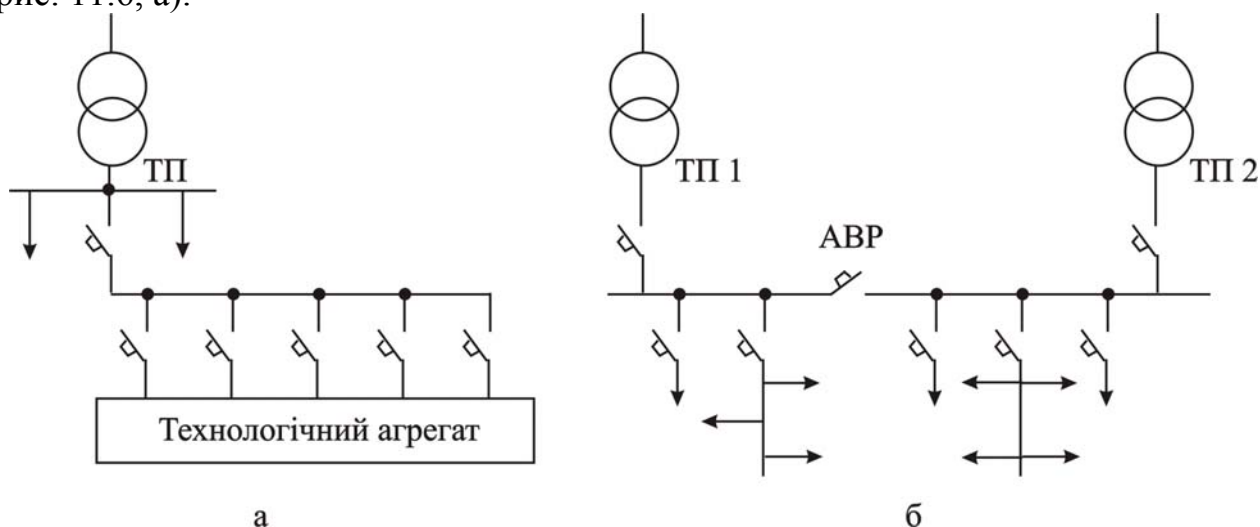


Рис. 11.6 – Схеми електропостачання виробничих споживачів:
а – магістральна; б – змішана; ТП – трансформаторна підстанція;
Т1, Т2 – трансформатори двохтрансформаторної ТП

За радіальною схемою підключаються найбільш потужні електроприймачі або окремі розподільчі пункти.

Але радіальні або магістральні схеми застосовують рідко. Найбільшого поширення набули змішані схеми, що поєднують і радіальні і магістральні ознаки (рис. 11.6, б).

Схеми освітлювальних мереж. Електропостачання світильників загального освітлення будівель здійснюється за напруги 380/220 В змінного струму при заземленій нейтралі і за напруги 220 В при ізольованій нейтралі. Для світильників місцевого освітлення з лампами розжарювання, або люмінесцентними лампами застосовується напруга не більше 220 В у приміщеннях без підвищеної небезпеки і не більше 42 В у приміщеннях з підвищеною небезпекою. Для переносних ручних світильників у приміщеннях з підвищеною небезпекою застосовується напруга до 42 В. При обмежених умовах роботи живлення переносних світильників повинно бути здійснене при напрузі до 12 В через спеціально призначені трансформатори.

Схеми електропостачання освітлювального навантаження в системі електропостачання цеху (ферми) будь-якого підприємства відповідають схемам електропостачання силового навантаження, що розглядалися вище. При цьому до схем електропостачання освітлювальних навантажень пред'являються наступні вимоги:

- електропостачання освітлювальної навантаження повинне забезпечуватися спільно з електропостачанням силового навантаження або роздільно від електропостачання силового навантаження. Доцільність суміщення живлення електроприймачів силових та освітлювальних навантажень повинна підтверджуватися техніко-економічними розрахунками;
- схеми живлення освітлювальних установок в будинках (ремонтні цехи і майстерні, бетонні і розчинні заводи, адміністративні приміщення) повинні допускати автоматизоване керування освітленням;
- схеми живлення освітлювальних установок повинні забезпечувати надійність і безпеку електропостачання.

Аварійне освітлення вимагає створення для нього самостійної системи електропостачання, незалежної від мережі робочого освітлення. Незалежним джерелом живлення аварійного освітлення є трансформатор, що одержує живлення від шин, не пов'язаних з шиною робочого освітлення, генератор, що приводиться первинним двигуном або акумуляторна батарея.

На рис. 11.7 наведено схему спільного живлення силового та освітлювального навантаження від двох одотрансформаторних підстанцій. Схема суміщеного живлення силового та освітлювального навантажень від одного трансформатора знижує кількість трансформаторів у порівнянні зі схемою роздільного живлення цих навантажень.

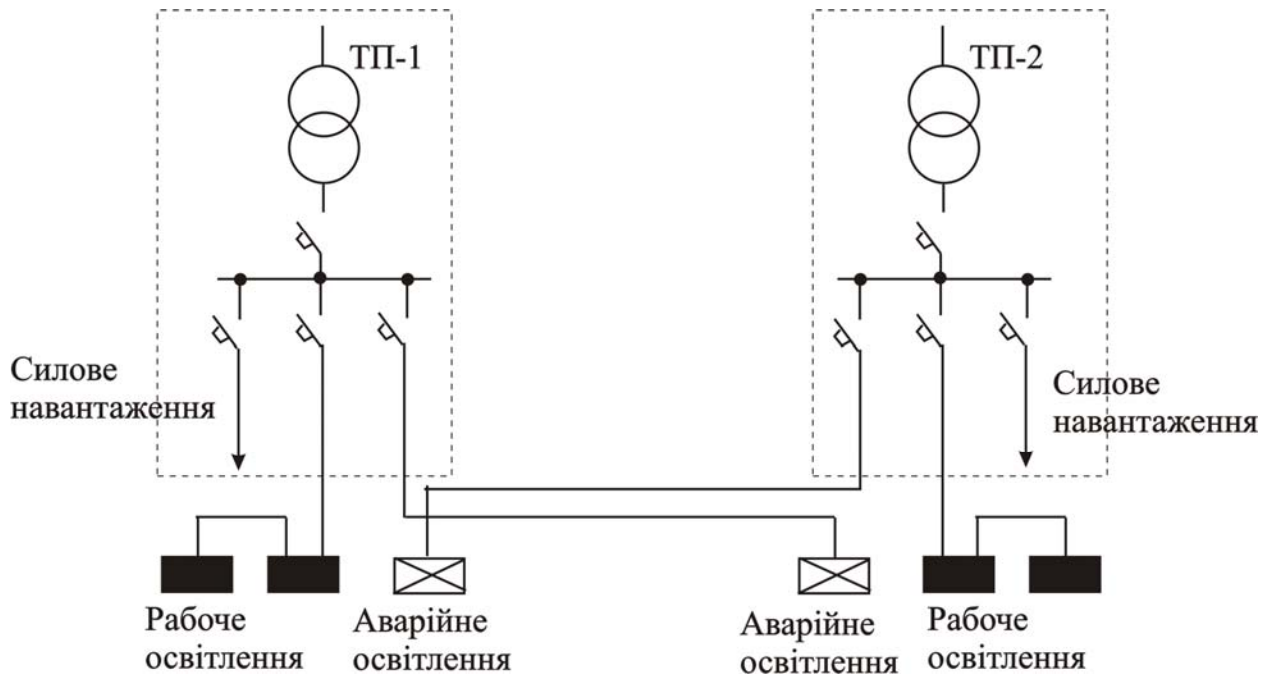


Рис. 11.7 – Схема спільного живлення силового та освітлювального навантажень від двох підстанцій (ТП-1 і ТП-2)

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Паначевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практикум [Текст]: підручник / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун; К. : Каравела, 2004. – 440 с.
2. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд. испр.) [Текст]: справочник / И. И. Алиев; Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с.
3. Рибалко М. П. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола [Текст]: підручник / М. П. Рибалко, В. О. Есауленко, В. І. Костенко; Донецьк: Новий світ, 2003. – 513 с.
4. Герасимов В. Г. Электротехника [Текст]: учебник / В. Г. Герасимов; М.: Высш. шк., 1985 – 480 с.
5. Забродин Ю. С. Промышленная электроника [Текст]: учебник / Ю. С. Забродин; М. : Альянс-книга КТК, 2008. – 496 с.
6. Морозов, А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника [Текст]: ученик / А.Г. Морозов; М.: Высш. шк., 1987. – 412 с.
7. Методичні вказівки до самостійного вивчення розділу «Електричні машини та електропривод». – Х. : ХНАМГ – 2006.
8. Шегедін О. І. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1 [Текст]: навчальний посібник / О. І. Шегедін, В. С. Маляр; Львів: Новий Світ, 2004. – 168 с.
9. Кравчик А. Э. Выбор и применение асинхронных двигателей [Текст]: учебник / А. Э. Кравчик, Э. К. Стрельбицкий, М. М. Шлаф; М. : Энергоатомиздат, 1987. – 346 с.
10. Розанов Ю. К. Электрические и электронные аппараты [Текст]: учебник / Ю. К. Розанов; М. : Информэлектро, 2001. – 428 с.
11. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисциплін "Електротехніка" і "Електротехніка в будівництві" (для студентів усіх форм навчання напрямів підготовки 6.060101 – «Будівництво», 6.060103 – «Гідротехніка (Водні ресурси)»). Укл.: О. Ф. Білоусов, Д. В.Тугай – Х.: ХНАМГ, 2010. – 30 с.
12. Иванов И. И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи [Текст]: ученик И. И. Иванов, А. Ф. Лукин, Г. И. Соловьев; Спб. : Лань, 2002. – 410 с.
13. Кислицин А. Л. Трансформаторы [Текст]: учебное пособие / А. Л. Кислицин; Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 76 с.
14. Щербаков Е. Ф. Электроснабжение объектов строительства [Текст]: учебное пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 404 с.
15. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемо техніка [Текст]: підручник / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. – К. : Каравела, 2009. – 416 с.

Навчальне видання

ДОРОХОВ Олександр Володимирович

ТУГАЙ Дмитро Васильович

КОЛОНТАЄВСЬКИЙ Юрій Павлович

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІН
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА» та
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА В БУДІВНИЦТВІ»

*(для студентів усіх форм навчання за напрямками підготовки
6.060101 – «Будівництво», 6.060103 – «Гідротехніка (Водні ресурси)»)*

Відповідальний за випуск *Д. В. Тугай*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Д. В. Тугай*

План 2012, поз. 110Л

Підп. до друку 03.01.2013

Формат 60 x 84/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 6,2

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.